



ESTUDO DO POTENCIAL DE CULTIVO E PRODUÇÃO DE BIOPRODUTOS DE
Gracilaria birdiae NA COSTA ORIENTAL DO ESTADO DO RIO GRANDE DO
NORTE/RN – BRASIL

Herika Mylena Medeiros de Queiroz Andrade

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Planejamento energético.

Orientador(es): Luiz Pinguelli Rosa

Neilton Fidelis da Silva

Rio de Janeiro
Agosto de 2021

ESTUDO DO POTENCIAL DE CULTIVO E PRODUÇÃO DE BIOPRODUTOS DE
Gracilaria birdiae NA COSTA ORIENTAL DO ESTADO DO RIO GRANDE DO
NORTE/RN – BRASIL

Herika Mylena Medeiros de Queiroz Andrade

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA
DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO
ENERGÉTICO.

Orientadores: Luiz Pinguelli Rosa

Neilton Fidelis da Silva

Aprovada por: Prof. Luiz Pinguelli Rosa

Prof. Neilton Fidelis da Silva

Prof. Marcos Aurélio Vasconcelos Freitas

Prof. Renato Samuel Barbosa de Araújo

Pesquisador Márcio Giannini Pereira

Prof. Maulori Curié Cabral

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2021

Andrade, Herika Mylena Medeiros de Queiroz

Estudo do Potencial de Cultivo e Produção de Bioprodutos de *Gracilaria birdiae* na Costa Oriental do Estado do Rio Grande do Norte/RN – Brasil / Herika Mylena Medeiros de Queiroz Andrade. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2021.

XIII, 119 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Luiz Pinguelli Rosa

Neilton Fidelis da Silva

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 102-119.

1. Macroalgas. 2. Algacultura. 3. Bioprodutos. 4. Desenvolvimento local. 5. Sustentabilidade. I. Rosa, Luiz Pinguelli *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

Aos meus pais, primeiros incentivadores do caminho acadêmico.

Ao meu mano, incentivador e encorajador.

Ao meu esposo, parceiro e apoiador.

Aos meus filhos, com todo amor, luta e empenho, deixo o exemplo.

A todas as mulheres que lutam diariamente para dar conta de tudo!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus! Por toda força e luz dada até a conclusão deste doutorado, superando inúmeros obstáculos, atravessando inclusive, uma pandemia.

Agradeço ao meu orientador, Neilton Fidelis da Silva, pelo incentivo para participar deste Programa de Doutorado, pelo apoio incondicional ao longo desta jornada, compreendendo as dificuldades que permeiam o universo feminino e que por muitas vezes dificultaram a consecução dos cronogramas, por todo conhecimento compartilhado ao longo desse tempo, pelo empenho em formar doutores para o país, pelo amor com o qual realiza o seu trabalho.

Ao meu orientador Luiz Pinguelli Rosa, pelo conhecimento e ensinamentos sobre energia repassados em suas falas, desde a aula inaugural deste doutorado. Levarei para sempre.

Aos professores Marcos Freitas, Emilio La Rovére, Amaro Olímpio, André Frossard, Maurício Arouca, do Programa de Planejamento Energético – PPE, pelo conhecimento repassado.

À coordenação local do DINTER/IFRN, Prof Renato Samuel, por toda dedicação e atenção ao longo deste doutorado.

Aos meus amigos de turma do DINTER/IFRN pela amizade e parceria em vários momentos, bons, alegres e de sufoco também, ao longo desta caminhada.

Um destaque especial à minha amiga Maria Luiza Galvão por se fazer presente em muitas orientações ao longo deste caminhar e ao meu amigo Eduardo Janser pelos múltiplos ensinamentos ao longo desse caminho.

Agradeço à Direção da Escola Agrícola de Jundiaí – EAJ pelo incentivo à participação no doutoramento.

Agradeço às Coordenações do Curso Técnico de Agroindústria da EAJ, que transcorreram ao longo do período em que cursei o doutorado, pelo apoio e compreensão.

Aos meus amigos da Escola Agrícola de Jundiaí - EAJ pelo apoio e incentivo.

Ao meu amigo e Professor Flavo Elano pela parceria na execução deste trabalho.

Ao meu amigo Maulori Curié Cabral pelos ensinamentos sobre algas, pela paciência e tempo despendidos ao longo desta jornada.

Ao meu amigo Dárlcio Inácio por me apresentar o mundo das algas marinhas.

Ao grupo de mulheres, da Associação das Maricultoras de Algas de Rio do Fogo – AMAR, pelo acolhimento e ensinamentos repassados.

À minha amiga, Jornalista, Advogada, Mãe e cunhada Flávia Urbano, pela parceria na revisão deste trabalho em meio a dez mil atividades realizadas por ela no momento de conclusão desta tese.

À minha amiga, Carol Chaves, pelo incentivo, apoio e suporte ao longo desse processo.

À minha mãe e a minha sogra, mulheres que me apoiaram e me deram o suporte necessário para eu realizar este doutorado.

Aos meus filhos pela compreensão e carinho despendido ao longo deste tempo de realização do doutorado.

Ao meu esposo, pelo apoio incondicional às minhas decisões por todo esse período.

Ao amigo arquiteto de mão cheia, Ubarana Júnior, pela colaboração neste trabalho.

Ao primo Lissandro Queiroz pela colaboração ao longo deste trabalho.

Aos meus amigos pela paciência e compreensão nas atividades sociais perdidas ao longo deste período.

A todos que fizeram parte deste longo processo, meu muito obrigada!

"Devemos cultivar o mar e cuidar de seus animais, usando os mares
como fazendeiros e não como caçadores."

Jacques Yves Cousteau

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ESTUDO DO POTENCIAL DE CULTIVO E PRODUÇÃO DE BIOPRODUTOS DE
Gracilaria birdiae NA COSTA ORIENTAL DO ESTADO DO RIO GRANDE DO
NORTE/RN – BRASIL

Herika Mylena Medeiros de Queiroz Andrade

Agosto/2021

Orientadores: Luiz Pinguelli Rosa

Neilton Fidelis da Silva

Programa: Planejamento Energético

A pesquisa está suportada pela importância e crescente interesse dedicado à expansão global do cultivo de algas marinhas, com destaque nas macroalgas, notadamente estabelecido como insumo produtivo nas indústrias alimentícia, farmacêutica, cosmética, nutracêutica, agrícola e, mais recentemente, considerado como um recurso promissor na produção de biocombustíveis. No Brasil, as macroalgas são cultivadas por técnicas simples, em pequena escala, em comunidades costeiras, mais acentuadamente no Nordeste brasileiro, com registro de iniciativas comerciais nas regiões Sul e Sudeste. Nesse contexto, objetiva analisar o potencial de produção de bioprodutos a partir da biomassa de macroalgas *Gracilaria birdiae*, considerando as dimensões técnica, econômica e socioambiental, tomando como estudo a área que compreende a costa oriental do estado do Rio Grande do Norte. O mapeamento de áreas propícias ao cultivo da espécie investigada, bem como os cenários de sua expansão e a estimativa de seu potencial produtivo de bioprodutos - Bioetanol, Biofertilizante e Ágar -, fez uso de dados espaciais de produção de biomassa nas áreas de cultivo existentes nas localidades de Rio do Fogo/RN e Pitanguí-Extremoz/RN. Dessa forma, tem-se mapeado, através de uma modelagem que considera diferentes variáveis do meio físico, como infraestrutura técnica e dados socioeconômicos em Sistema de Informação Geográfica, toda a espacialização da produção. Foram identificados 2.227,59 ha com aptidão para cultivo de algas, classificados em áreas de alta, média e baixa aptidão. Revelando uma proeminente potencialidade produtiva para os bioprodutos originados da Algacultura, atividade capaz de gerar emprego e renda às comunidades costeiras, fortalecendo a economia local de forma sustentável.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

STUDY OF THE CULTIVATION AND PRODUCTION POTENTIAL OF *Gracilaria birdiae* BIOPRODUCTS IN THE EASTERN COAST OF THE STATE OF RIO GRANDE DO NORTE/RN – BRAZIL

Herika Mylena Medeiros de Queiroz Andrade

August/2021

Advisors: Luiz Pinguelli Rosa
Neilton Fidelis da Silva

Program: Energy Planning

The research is supported by the importance and growing interest dedicated to the global expansion of marine algae cultivation, with emphasis on macroalgae, notably established as a productive input in the food, pharmaceutical, cosmetic, nutraceutical, agricultural industries and, more recently, considered a promising resource in biofuels production. In Brazil, macroalgae are cultivated by simple techniques, on a small scale, in coastal communities, especially in the Brazilian Northeast, with some commercial initiatives in the South and Southeast regions. In this context, it aims to analyze the potential for production of bioproducts from the macroalgae biomass *Gracilaria birdiae*, considering the technical, economic and socio-environmental dimensions, taking as a study the coast east area of the state of Rio Grande do Norte. The mapping of areas suitable for the cultivation of the investigated species, as well as the scenarios for its expansion and the estimation of its production potential for bioproducts - Bioethanol, Biofertilizer and Agar - made use of spatial data on biomass production in the cultivation areas installed in the localities of Rio do Fogo/RN and Pitangui-Extremoz/RN. In this way, through a modeling that considers different physical environment variables, such as technical infrastructure and socioeconomic data in a Geographic Information System, the entire spatialization of production has been mapped, accounting 2,227.59 ha identified as suitable for algae cultivation, classified in areas of high, medium, and low suitability. Presenting a prominent productive potential for bioproducts originating from Algaculture, activity capable of generating employment and income for coastal communities, sustainably strengthening the local economy.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	1
CAPÍTULO I – ALGAS MARINHAS: CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÕES	9
1.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ALGAS	9
1.1.1 Caracterização da Espécie <i>Gracilaria birdiae</i>	13
1.1.2 Taxonomia da espécie <i>Gracilaria birdiae</i>	15
1.1.3 Caracterização Bioquímica da <i>Gracilaria birdiae</i>	17
1.2 ALGAS MARINHAS E SUAS APLICAÇÕES	21
1.3 INTERESSE COMERCIAL	23
1.4 O GÊNERO GRACILARIA E O SEU ATRATIVO COMERCIAL	26
1.4.1 A espécie <i>Gracilaria birdiae</i>	27
1.5 O CULTIVO DAS ALGAS – ALGACULTURA	30
1.6 ALGAS MARINHAS COMO BIOMASSA PARA BIOCOMBUSTÍVEIS	40
CAPÍTULO II – ALGAS NO BRASIL	46
2.1 ALGAS NO BRASIL	46
2.1.1 O cultivo de algas no Brasil	49
2.1.2 Cultivo de macroalgas no Rio grande do Norte	53
2.1.3 Caracterização dos municípios produtores de algas no Rio Grande do Norte	54
2.2 O CULTIVO DE MACROALGAS COMO ALTERNATIVA PARA DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SOCIAL DAS COMUNIDADES COSTEIRAS	58
2.3 CULTIVO DE ALGAS E EMPODERAMENTO FEMININO NO LITORAL DO RN	60
CAPÍTULO III – PERCURSO METODOLÓGICO	63
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO	63
3.1.1 Área de Estudo	63
3.2 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE ÁREAS DE CULTIVO	66
3.2.1 Indicadores de Vulnerabilidade Socioeconômica e ambiental	71
3.2.2 Indicadores da Sustentabilidade Socioeconômica e ambiental	76

3.3 ESTIMATIVA DO POTENCIAL PRODUTIVO DA BIOMASSA DE MACROALGAS <i>GRACILARIA BIRDIAE</i>	77
3.4 ESTIMATIVA DO POTENCIAL PRODUTIVO DE BIOPRODUTOS DA BIOMASSA DE <i>GRACILARIA BIRDIAE</i>	82
3.4.1 Bioetanol.....	82
3.4.2 Biofertilizante	83
3.4.3 Ágar	83
CAPÍTULO IV – POTENCIALIDADES DA ATIVIDADE DE CULTIVO DE MACROALGAS, NO LITORAL ORIENTAL DO RIO GRANDE DO NORTE	85
4.1 SUSTENTABILIDADE SOCIOECONÔMICA E AMBIENTAL DAS POTENCIAIS ÁREAS DE CULTIVO	85
4.2 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE BIOMASSA DE MACROALGAS	91
4.3 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE BIOPRODUTOS	93
4.3.1 Bioetanol	93
4.3.2 Biofertilizante.....	93
4.3.3 Ágar	94
CONCLUSÕES	97
REFERÊNCIAS.....	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Macroalga <i>Gracilaria birdiae</i>	14
Figura 2 - Classificação da <i>Crassiphycus birdiae</i>	15
Figura 3 - Distribuição do gênero <i>Gracilaria</i> pela costa brasileira	27
Figura 4 - Moderno barco desenvolvido para colheita de algas	36
Figura 5 - Colheita mecanizada de algas	36
Figura 6 - Colheita mecanizada de <i>Laminaria hyperborea</i> na Noruega	37
Figura 8 - Locais de cultivo de algas marinhas, marcados em vermelho e a capital do estado destacado em polígono listrado	54
Figura 9 - Representação do Litoral Oriental do estado do RN. Destacado em manchas vermelhas, as áreas costeiras com potencial de produção de macroalgas identificadas por Sousa <i>et al.</i> (2012).	65
Figura 10 - Mapa de aptidão para o desenvolvimento do cultivo de macroalgas da espécie <i>Gracilaria birdiae</i> no litoral do RN – Brasil.	70
Figura 11 - Fluxo da modelagem espacial com a incorporação de critérios de vulnerabilidade socioeconômica e ambiental para identificação de áreas de cultivo com maior aptidão	71
Figura 12 - Superfície de Custo de Distância (SCD) hipotética	74
Figura 13 - Desenho esquemático do SMB flutuantes utilizadas no cultivo de <i>Gracilaria birdiae</i> na Praia de Pitangui /RN, Brasil.....	79
Figura 14 - Desenho esquemático da disposição das balsas no SMB flutuantes utilizadas no cultivo de <i>Gracilaria birdiae</i> na Praia de Pitangui /RN, Brasil	80
Figura 15 - Desenho esquemático da balsa flutuante utilizada no cultivo de <i>Gracilaria birdiae</i> na Praia de Pitangui /RN, Brasil.....	81
Figura 16 - Desenho esquemático da ancoragem das balsas no SMB utilizada no cultivo de <i>Gracilaria birdiae</i> na Praia de Pitangui /RN, Brasil.....	81
Figura 17 - Litoral Oriental do RN destacando as áreas de maiores mudanças ambientais (manchas amarelas com contornos vermelhos), sobrepostas pela distribuição da renda familiar da população localizada nos distritos próximos às áreas com potencial de cultivo.....	86
Figura 18 - Classificação das áreas costeiras pelo nível de vulnerabilidade socioeconômica e ambiental e a localização das áreas propícias ao cultivo.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estimativa do valor de atacado dos principais cinco gêneros de algas produzidos no mundo.....	25
Tabela 2 - Os principais países produtores de macroalgas.....	38
Tabela 3 - Quantidade ficocolóides importados pelo Brasil em 2020.....	52
Tabela 4 - Caracterização dos municípios produtores de algas no Rio Grande do Norte.....	57
Tabela 5 - Matriz de comparação pareada para avaliação da importância relativa dos parâmetros para o cultivo de algas marinhas no RN.....	68
Tabela 6 - Localidades de cultivos de macroalgas com as áreas em ha classificadas em níveis de vulnerabilidade socioeconômica e ambiental.....	90
Tabela 7 - Estimativa do Potencial de Produção de Biomassa e Bioprodutos - Bioetanol - Biofertilizante e Ágar - a partir do Cultivo de Macroalgas da espécie <i>Gracilaria birdiae</i>	95

INTRODUÇÃO GERAL

As macroalgas são usadas pela humanidade há muito tempo por terem várias aplicações, principalmente na alimentação humana e animal, cosméticos e fertilizantes (RIOUX; TURGEON, 2015). A partir da década de 2000 foram demonstradas as possibilidades de as mesmas também serem utilizadas na produção de biocombustíveis Sudhakar *et al.* (2018), Ghadiryanfar *et al.* (2016), Fernand *et al.* (2017), isto porque, muitas espécies de macroalgas apresentam excelentes taxas de crescimentos e são ricas em carboidratos, que podem ser fermentados em processos de produção de biocombustíveis (HARGREAVES, 2012; HARGREAVES *et al.*, 2013; RIOUX; TURGEON, 2015). Além disso, o uso de macroalgas como sequestradoras de dióxido de carbono reduz a eutrofização no mar, contribuindo para o equilíbrio do ecossistema marinho, bem como para a mitigação do CO₂ atmosférico, reduzindo o efeito estufa no planeta (SONDAK *et al.*, 2016; LAGO *et al.*, 2019).

As macroalgas estão presentes na nossa vida e a cada dia se descobrem novas aplicações para elas, gerando assim um contínuo aumento na demanda por esse recurso (McHugh, 2003; White; Wilson, 2015; Qin, 2018). O cultivo de macroalgas tem sido desenvolvido em diferentes regiões do mundo, este deve ser fortemente alicerçado nos princípios de sustentabilidade, para atender diversos fatores: i) a limitação dos bancos naturais de macroalgas frente ao aumento da demanda; ii) o potencial de lucratividade presente na atividade; iii) a busca de trabalho e renda para as comunidades costeiras; iv) o estímulo a projetos de desenvolvimento industrial de países tropicais destinado a geração de emprego e renda nas áreas costeiras com baixo desenvolvimento social e vulnerabilidade ambiental (Rebours *et al.*, 2014).

Nesse contexto, os desafios assentados no desenvolvimento do cultivo de macroalgas como fonte de biomassa destinada a diferentes usos, inclusive a produção de biocombustível, exige o conhecimento das possíveis dificuldades e oportunidades encontradas na instalação de uma cadeia produtiva. Segundo Rebours *et al.* (2014), a estruturação da cadeia produtiva de macroalgas deve atentar para os impactos socioeconômicos e ambientais, para os custos associados e infraestrutura, bem como para as políticas públicas regulatórias que precisam ser adotadas e os incentivos governamentais para este fim. Torna-se, portanto, de fundamental importância compreender que a promoção da sustentabilidade nesta atividade exige não só viabilidade econômica, mas também viabilidade social, cultural, política e ambiental (Rebours *et al.*, 2014; Pereira *et al.*, 2015).

O cultivo de macroalgas ou Algacultura é uma atividade que movimentou milhões de dólares por ano, liderada pelos países asiáticos, em 2018, atingiu a cifra de USD 13 300 milhões (FAO, 2020). No período de 1990 a 2018, a produção mundial de macroalgas com importância econômica aumentou significativamente, saltando dos 3,8 milhões de toneladas em 1990, para 32,4 milhões de toneladas em 2018. Estatisticamente, nesse período, o total de pessoas envolvidas na pesca de captura reduziu de 83% para 68%, enquanto a participação nas atividades de aquicultura passou de 17% para 32% (FAO, 2020).

No Brasil, as macroalgas são cultivadas por técnicas simples, em pequena escala e em comunidades costeiras, mais acentuadamente no Nordeste brasileiro. Nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, observa-se iniciativas de cultivos comerciais envolvendo a *Kappaphycus alvarezii*, uma espécie de macroalga vermelha produtora de carragena (Pellizzari; Reis, 2011). Tal atividade tem potencial para contribuir para o desenvolvimento ambiental, social e econômico, de forma sustentável (Rebours *et al.*, 2014; Gelli, 2019). Podendo, nesse ambiente, promover a geração de emprego e renda através da produção de diversos bioprodutos, como bioetanol, biofertilizante, cosméticos, carragena, entre outros (Bezerra, 2008; Rebours *et al.*, 2014; Soriano, 2017).

Muitos gêneros de macroalgas se destacam na produção mundial de produtos economicamente importantes para as indústrias, cerca de 291 espécies são utilizadas com esta finalidade (WHITE; WILSON, 2015). Um deles, o gênero *Gracilaria*, pertencente ao grupo de algas vermelhas (Rhodophyta), está distribuído em todas as regiões tropicais do mundo e encontra-se entre os mais produtivos mundialmente (FAO, 2020). Macroalgas deste gênero são importantes produtoras de ágar, sendo a espécie *Gracilaria birdiae* o tipo de alga vermelha explorada economicamente para extração deste bioproduto no nordeste do Brasil (McHUGH, 2003; BAGHEL *et al.*, 2014; REBOURS *et al.*, 2014; FERREIRA, 2015).

As macroalgas têm como um dos seus constituintes predominantes os polissacarídeos, que podem ser hidrolisados em açúcares fermentáveis e destinados a produção de etanol de terceira geração (HARGREAVES *et al.*, 2013; TAN; LEE, 2014; CHEN *et al.*, 2015; GHADIRYANFAR *et al.*, 2016; JIANG *et al.*, 2016; CASTRO *et al.*, 2017; ADENIYI *et al.*, 2018; SUDHAKAR *et al.*, 2018). No que concerne ao emprego dessas macroalgas para a produção de biocombustível, os estudos disponíveis são incipientes (Fernand *et al.*, 2017). No entanto, corroboram que as macroalgas apresentam um grande potencial de produção para esta finalidade (GHADIRYANFAR *et al.*, 2016; FERNAND *et al.*, 2017; HARGREAVES *et al.*, 2013; TAN; LEE, 2014; CHEN *et al.*, 2015;

ADENIYI *et al.*, 2018; KHAMBHATY *et al.*, 2012; SHUKLA *et al.*, 2016; KUMAR *et al.*, 2013; KUMAR *et al.*, 2016). Estes estudos apontam também que esta atividade tem potencialidade para se tornar uma alternativa tecnológica que pode assumir papel relevante no mercado mundial de biocombustíveis líquidos. Esta alternativa adere-se à infraestrutura de distribuição utilizada no mercado convencional de combustíveis líquidos e tecnologias de utilização final, podendo a mesma ser introduzida e mantida em uso, com pequenos ajustes, sem, portanto, adicionar custos significativos ao processo de distribuição.

Nesse ambiente, o cultivo de macroalgas para produção de biocombustíveis ganha mais importância, já que a procura por “fontes ambientalmente amigáveis” a serem utilizadas para assegurar a crescente demanda por combustíveis líquidos, tende a aumentar, pois segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), a população atual ultrapassa o número de 7,6 bilhões de pessoas no planeta, com estimativa de chegada aos 9 bilhões até 2050. Fator que acarretará de forma crescente uma maior demanda por alimentos, transportes, combustíveis líquidos e fornecimento de energia elétrica (ONU, 2017).

Desta forma, a participação dos combustíveis produzidos a partir de fontes renováveis tendem a ampliar a participação na matriz energética mundial (FERNAND *et al.*, 2017). Nestes termos, as macroalgas representam atrativos competitivos à produção de biocombustíveis quando comparadas à outras fontes de biomassas, uma vez que estas concorrem com a produção de alimentos, fazem uso da terra agricultável e dependem de água, fertilizantes e defensivos (KRAAN, 2013). Diante destas vantagens, as macroalgas, fonte promissora de matéria-prima para a produção de biocombustíveis de terceira geração, são consideradas como potenciais matérias-primas para a produção de bioetanol em grande escala (FERNAND *et al.*, 2017).

No Nordeste brasileiro, e em especial no estado do Rio Grande do Norte/RN, objeto dessa tese, a exploração comercial de macroalgas marinhas teve seu início na década de 1960 (BEZERRA, 2008; REBOURS *et al.*, 2014; SORIANO, 2017). Onde desenvolveu-se uma rede comercial com vista à exploração das macroalgas agarófitas e carragenófitas, as quais desempenharam um papel importante na economia das populações litorâneas (BEZERRA, 2008; SORIANO, 2017). Até meados de 1970, parte representativa desta população, impulsionada pelo atrativo econômico registrado à época, encontrava na colheita das macroalgas de interesse industrial, um complemento de renda acrescida a outras atividades praticadas, como por exemplo, a pesca (BEZERRA, 2008; SORIANO, 2017).

A colheita de macroalgas ainda persiste em comunidades costeiras ao longo do litoral do Rio Grande do Norte como uma atividade secundária, onde registra-se nos municípios de Extremoz – RN e Rio do Fogo – RN, ações voltadas ao cultivo comercial de macroalgas vermelhas, do gênero *Gracilaria* através de duas associações de maricultoras (ONU, 2018).

Dentre os principais aspectos condicionantes do pleno desenvolvimento da Algaicultura, a seleção de áreas potenciais de cultivo é um dos temas que têm sido mais considerados na literatura como fundamental para a sustentabilidade da produção na aquicultura. Na seleção de áreas, levam-se vários fatores em consideração, incluindo os atributos ambientais e socioeconômicos de áreas potenciais (Nath *et al.*, 2000; Salam *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2013). No caso do cultivo de macroalgas, entre os critérios analisados, alguns são de fundamental importância, como a existência e condições de áreas abrigadas da costa (ventos, correntes, ondas etc.), a proximidade de bancos de macroalgas, a infraestrutura viária para escoamento da produção, mercados, entre outros (SOUSA *et al.*, 2012).

Os estudos de seleção de áreas para cultivo e determinação de sua potencialidade produtiva geralmente empregam tão somente fatores de seleção a partir de atributos técnicos que qualificam as áreas que podem abrigar estruturas de cultivo, negligenciando outros fatores como os socioeconômicos e ambientais e, portanto, as vulnerabilidades locais vinculadas a estes (ANDRADE *et al.*, 2020). A pesquisa realizada nesta tese sobrepuja essas limitações ao fazer uso de critérios fundamentais para seleção de áreas, utilizando dados de natureza física, social e de infraestrutura (NATH *et al.*, 2000; SALAM *et al.*, 2003; RADIARTA *et al.*, 2008; SOUSA *et al.*, 2012).

A expansão das atividades do cultivo de algas na costa brasileira demanda de um mapeamento de áreas propícias a este cultivo que não concorram com outras atividades presentes na região, a exemplo da pesca, turismo e navegação. Tais áreas não podem apresentar impactos negativos à dinâmica social das comunidades, bem como ao seu meio ambiente.

Ponderando apenas critérios físicos, por meio de seleção, dimensionamento e hierarquização de espaços adequados para o cultivo de macroalgas *Gracilaria birdiae*, o litoral oriental do estado do Rio Grande do Norte tem mapeado uma área de 2.232.20 ha viável a este fim (SOUSA *et al.*, 2012).

Nesse contexto, esta tese incorpora indicadores de sustentabilidade social e ambiental ao modelo de seleção das áreas propícias para o cultivo de macroalgas *Gracilaria birdiae* feito por Liu *et al.* (2013). A partir da inclusão desses indicadores, é possível

avaliar as potencialidades da atividade de cultivo dessa macroalga, no litoral oriental do RN, estimando áreas recomendadas como adequadas, juntamente com o seu potencial de produção de biomassa, incluído nessas estimativas seu potencial de produção anual de bioprodutos.

A pesquisa apresenta as condicionantes que apontam positivamente para o aproveitamento das algas marinhas como insumo à produção de bioprodutos, nos quais se encontram os biocombustíveis, para estes registram-se argumentações favoráveis à sua potencial contribuição à promoção da sustentabilidade, através do reforço à segurança do abastecimento energético do país, em bases renováveis, possibilitando, assim, a redução dependência nacional do uso dos combustíveis fósseis, e, por consequência, mitigando as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) em diferentes setores da economia, com destaque no setor de transporte, além de geração de emprego e renda. Nesse enquadramento, prioriza-se uma análise das oportunidades advindas de uma maior participação das algas marinhas, em termos de oferta de bioprodutos, e sua potencial contribuição à sustentabilidade ambiental, social e econômica.

Dessa forma, a pesquisa está norteada pela **hipótese** de que as algas marinhas apresentam viabilidade técnica, socioeconômica e ambiental para a constituição de sua cadeia produtiva, utilizando como referência os dados espaciais de produção registrados na costa oriental do Rio Grande do Norte. Sua projeção potencial, quando ampliada a escala de área de cultivo, se mostra significativa. A hipótese está estruturada nas seguintes premissas:

- O potencial técnico produtivo de macroalgas (*Gracilaria birdiae*) no litoral do RN;
- Potencial de geração de emprego e renda no espaço regional para as comunidades costeiras onde se registra baixo nível de desenvolvimento socioeconômico.

Nesse contexto, a pesquisa lastreia-se no **objetivo geral** de analisar o potencial de produção de bioprodutos a partir da biomassa de macroalgas, considerando as dimensões técnica, econômica e socioambiental, tomando como estudo a área que compreende a costa oriental do estado do Rio Grande do Norte.

Quanto a seus **objetivos específicos**, tem-se:

- i) Caracterizar a produção de macroalgas para oferta de Bioprodutos a partir da experiência mundial e seus estágios de desenvolvimento no Brasil;
- ii) Apresentar a estrutura produtiva de macroalgas, na costa oriental potiguar;

iii) Estimar a produção de macroalgas através da Algacultura, na costa oriental potiguar, como fonte de biomassa para produção de bioprodutos, estruturando cenários de expansão de seu cultivo.

Para consecução dos objetivos propostos, a tese parte de uma pesquisa bibliográfica que caracteriza o estado da arte do aproveitamento das algas marinhas para diferentes bioprodutos. Desenvolve um estudo circunscrito a avaliação do potencial produtivo de macroalgas *Gracilaria birdiae* para produção de bioprodutos na costa oriental do Estado do Rio Grande do Norte, empregando neste as experiências de produção dessa espécie nas áreas cultivadas nas localidades de Rio do Fogo/RN e Pitangui-Extremoz/RN.

O alcance dos objetivos propostos segue um percurso metodológico, por meio de um conjunto de procedimentos orientados à apropriação de uma análise crítica e reflexiva do estágio do conhecimento científico, dos atos governamentais, das orientações do setor produtivo e sociedade civil organizada que guiam (ou devem nortear) as necessárias políticas públicas orientadas ao estabelecimento de uma cadeia produtiva que possa viabilizar o aproveitamento da biomassa de macroalgas, tomado como base o caso da costa oriental do Estado do Rio Grande do Norte.

A caracterização técnica das algas marinhas foi feita através de uma imersão na literatura existente, incluindo o conhecimento produzido como resultado dos estudos e pesquisas realizadas, tendo como orientação de estudo o aproveitamento das algas marinhas como biomassa para extração de bioprodutos.

O conhecimento e a representação do perfil da experiência mundial, exposta na literatura, sobre a estrutura produtiva de macroalgas, no que concerne aos seus aspectos tecnológicos, socioeconômicos e ambientais, foram referências para a análise comparativa e representação dessa mesma estrutura de produção na costa oriental potiguar.

As estimativas de ampliação da produção de macroalgas através da Algacultura, para a oferta de bioprodutos na costa oriental Potiguar, foi fundamentada em pesquisas aderentes ao tema, bem como pela da estrutura de produção existente na área de estudo (ANDRADE NETO, 2015). Nestas, as potencialidades da expansão do cultivo da macroalga *Gracilaria birdiae* na costa oriental potiguar foram mapeadas por meio de procedimentos metodológicos que incluem:

a) Levantamento e análise da bibliografia e documentos básicos pertinentes à temática; dentre os quais destacam-se: as leis, os decretos e as portarias que completam

a legislação básica referente da produção de Algas marinhas e a expansão da participação dos biocombustíveis no Brasil;

- b) Coleta de dados, junto a instituições ligadas ao setor, a exemplo de agentes dos Governos Federais e Estaduais, Órgãos ambientais, dentre outras, de forma possibilitar uma descrição crítica do processo regulatório do setor;
- c) Mapeamento de áreas propícias ao cultivo de macroalgas no litoral do estado do Rio Grande do Norte, através de georreferenciamento das áreas adequadas ao cultivo de macroalgas e à formação de uma base de dados em ambiente GIS para integração dos dados espaciais coletados;
- d) Incorporação de indicadores de sustentabilidade social e ambiental às áreas propícias para o cultivo de macroalgas identificadas no mapeamento do litoral do estado;
- e) Avaliação das potencialidades da atividade de cultivo de macroalga, no litoral oriental do RN.

Os Cenários de expansão do cultivo de macroalgas, da espécie *Gracilaria birdiae* e a estimativa de seu potencial produtivo fez uso de dados espaciais de produção de biomassa nas áreas de cultivo existentes nas localidades de Rio do Fogo/RN e Pitangui-Extremoz/RN. Dessa forma, tem-se mapeado, através de uma modelagem que considera diferentes variáveis do meio físico, como infraestrutura técnica e dados socioeconômicos em Ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica), toda a espacialização da produção.

A validação dos mapas gerados referentes às localizações de cultivos é feita através do uso de classes das áreas de maior e menor potencial. Utiliza-se, para tanto, técnicas de georreferenciamento dos atuais cultivos e informação de produção de macroalgas anual das áreas, por meio de técnicas computacionais para o tratamento da informação geográfica.

Neste quadro, a tese está estruturada em uma Introdução Geral seguida de cinco capítulos, assim descritos:

Capítulo 1 – Algas marinhas: caracterização e aplicações – Este capítulo faz uma caracterização geral sobre as algas, enquanto organismos fotossintéticos divididos em três grandes grupos: algas vermelhas (Rhodophytas), algas marrons (Phaeophytas) e algas verdes (Chlorophytas). Apresenta os benefícios (serviços ecossistêmicos) ofertados ao meio ambiente, os diversos compostos bioativos destes organismos e suas aplicações nas várias áreas da ciência e indústria.

O capítulo apresenta ainda a produção mundial de macroalgas, como uma atividade que movimentava grandes valores monetários, considerando-se sua importância e interesse comercial para o mercado mundial. Explana sobre o gênero mais importante na produção de agar, o gênero *Gracilaria*, amplamente distribuído pelo mundo e na costa brasileira, encontrado de forma mais diversificada e abundante na costa nordeste do país e apresenta a biomassa de macroalgas como um recurso promissor para produção de biocombustíveis.

O Capítulo 2 – Algas no Brasil – inicia-se com o histórico da produção de algas no Brasil, desde a consolidação da ciência que estuda as algas – Ficologia – até o estágio produtivo atual no país, caracteriza a produção de macroalgas a partir da experiência mundial e seus estágios de desenvolvimento no Brasil e no estado do Rio Grande do Norte.

O capítulo apresenta o cultivo de macroalgas como alternativa para desenvolvimento econômico social das comunidades costeiras e aponta o cultivo de algas como uma forma de empoderamento feminino no litoral do RN.

O Capítulo 3 – Percurso Metodológico – expõe o percurso metodológico adotado para alcançar os objetivos propostos da presente tese. Fazendo uso de um estudo de caso, o capítulo analisa a estrutura produtiva de macroalgas, na Costa Oriental Potiguar e incorpora indicadores de sustentabilidade social e ambiental ao mapeamento realizado através do georreferenciamento remoto do litoral do estado quando na identificação de áreas adequadas para o cultivo de macroalgas.

O Capítulo 4 – Potencialidades da Atividade de Cultivo de Macroalgas, no Litoral Oriental do Rio Grande do Norte – apresenta a estimativa realizada da produção de macroalgas, através da Algacultura praticada na Costa Oriental Potiguar, como fonte de biomassa para produção de bioprodutos, estruturando cenários de expansão de seu cultivo nessa região, considerando nestes cenários condicionantes socioeconômicas e ambientais.

As projeções feitas, neste capítulo, fazem uso de um tratamento digital em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica) visando uma melhor definição de inclusão ou exclusão, de áreas potenciais para a produção de macroalgas na região de estudo. Desta forma, o capítulo georreferencia os resultados extraídos dos cenários e as estimativas obtidas.

O Capítulo 5 – Conclusões

Neste capítulo encontram-se traçadas as considerações finais da pesquisa.

CAPÍTULO I – ALGAS MARINHAS: CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÕES

1.1 Caracterização das Algas

As algas marinhas ou macroalgas são organismos abundantes em nosso planeta, possuem elevada importância ambiental constituindo a base da cadeia alimentar nos oceanos, desempenhando um papel fundamental na manutenção da vida marinha (SAMARAKOON; JEON, 2012) uma vez que são responsáveis pela elevada taxa de fotossíntese do bioma marinho (SONDAK *et al.*, 2016). Dessa forma, são importantes produtoras de oxigênio e matéria orgânica, proporcionando alimento e abrigo aos organismos através de suas associações com corais, tornando-se assim responsáveis também pela estruturação dos ecossistemas aquáticos, quando formam bancos de algas entre marés e recifes de algas calcárias, o que possibilita a continuidade da fauna existente neste bioma (HARGREAVES, 2012; HOLANDA, 2016).

Exercem assim um importante papel no ciclo do carbono, transformando o dióxido de carbono em carboidratos, por meio da fotossíntese e em carbonato de cálcio, pela calcificação (AMÂNCIO, 2007). Além disso, o uso das algas como sequestradoras de dióxido de carbono reduz a eutrofização no mar, contribuindo para o equilíbrio do ecossistema marinho, para a mitigação do CO₂ atmosférico e, por consequência, impacta positivamente na intensificação do efeito estufa (SONDAK *et al.*, 2016; LAGO *et al.*, 2019).

As macroalgas geralmente habitam na zona litorânea, podem ter diferentes formas, tamanhos, cores e composição (MAKKAR *et al.*, 2016). Ademais, são responsáveis por uma boa parte da atividade fotossintética global e sua distribuição está condicionada aos fatores de temperatura e salinidade da água, intensidade de luz solar, correntes oceânicas e concentração de nutrientes na água (MAKKAR *et al.*, 2016; HOLANDA, 2016).

As algas são, por conseguinte, organismos fotossintéticos que podem ser divididos em três grupos: i) microalgas; ii) cianobactérias e; iii) macroalgas (PIRES, 2017).

As Microalgas são microrganismos unicelulares eucarióticos, com tamanhos variando entre 3 e 10 µm (HOLANDA, 2016). Neste grupo, as espécies mais estudadas

para a produção de biocombustíveis são: *Chlamydomonas reinhardtii*, *Chlorella*, *Dunaliella salina* e diatomáceas.

As Cianobactérias por sua vez, são microrganismos procarióticos unicelulares que apresentam altas taxas de crescimento, podendo dobrar de tamanho no intervalo de 10 h. Apresentam baixo teor de lipídios e um elevado percentual de proteínas em torno de 65%, o que as tornam bastante utilizadas no mercado de alimentos, a espécie *Spirulina* é a representante mais conhecida deste grupo (PIRES, 2017).

Já as **Algas Marinhas ou Macroalgas**, são organismos aquáticos multicelulares eucarióticos, abundantes nos oceanos e nas águas costeiras, não apresentam alto teor de lipídios e sim, um alto percentual de carboidratos (PIRES, 2017 e RIOUX; TURGEON, 2015). As macroalgas são classificadas em três Filos: i) Phaeophyta (algas marrons); ii) Chlorophyta (algas verdes); iii) Rhodophyta (algas vermelhas).

De acordo com Fujii (2016), as macroalgas são organismos autotróficos fotossintéticos, aquáticos, multicelulares, não vasculares, desprovidas de flores e sementes, sem estruturas reprodutivas protegidas e produtoras de esporos. São denominadas talófitas, ou plantas inferiores, por não apresentarem uma estrutura vegetal diferenciada em raiz, caule e folhas.

Por não apresentar uma estrutura vegetal diferenciada, esses organismos possuem uma diferenciação complexa, sendo o reconhecimento das espécies, e em alguns casos até mesmo dos gêneros, uma tarefa complexa devido à grande diversidade de espécies existentes, cabendo a Ficologia a responsabilidade por tais identificações e descrição das espécies (COSTA, 2013).

Para realizar de forma eficaz o reconhecimento das espécies de macroalgas, tem-se feito a caracterização através de marcadores moleculares que, taxonomicamente, tem sido eficiente na discriminação das espécies (AYRES-OSTROCK, 2014). De acordo com Avise (1994), os marcadores moleculares são definidos como todo e qualquer fenótipo molecular proveniente de um gene expresso ou de um segmento específico de DNA. O uso desses marcadores produz informações sobre o fluxo gênico, estrutura populacional, relações filogeográficas, biogeografias e análises de parentesco e paternidade (FÉRAL, 2002).

As informações geradas através das tecnologias de identificação, como os marcadores moleculares citados anteriormente, auxiliam na complexa tarefa de identificação das algas. Para se obter a identificação precisa da espécie, uma sequência

critérios de identificação devem ser seguidos, de forma organizada e reconhecida mundialmente (ALGAEBASE, 2020a).

A sequência de identificação para a classificação taxonômica das algas se inicia com a identificação do Império ao qual o organismo pertence, seguida pelo Reino, Sub-reino, Filo, Subfilo, Classe, Subclasse, Ordem, Família, Subfamília, Tribo, Gênero e finalmente a espécie. A aplicação de nomes de grupos taxonômicos é determinada por meio de tipos nomenclaturais e são regidos pelo ICN – Conjunto de Regras e Recomendações – anteriormente denominado de Código Internacional de Nomenclatura Botânica (ICBN), que rege a nomenclatura científica de todos os organismos tradicionalmente tratados como algas, fungos ou plantas, sejam fósseis ou não fósseis, incluindo algas verdes azuis (cianobactérias), quitrídeos, oomicetos, fungos viscosos, e protistas fotossintéticos com seus grupos não fotossintéticos taxonomicamente relacionados, mas excluindo o gênero Microsporidia (ICN, 2018).

Após a identificação das espécies, constando as informações taxonômicas, nomenclaturais e distribucionais, forma-se assim um conjunto de informações que será armazenado em um banco de dados global de algas, o AlgaeBase (ALGAEBASE, 2020). Este banco de dados está disponibilizado em um periódico on-line, gratuito e de acesso livre, o Notulae Algarum, que é revisado por pares e publicado pelo AlgaeBase como parte de seus serviços para a comunidade ficológica (NOTULAE ALGARUM, 2020).

A classificação taxonômica da espécie *Gracilaria birdiae*¹, objeto de estudo desta tese, é: Império Eukaryota, Reino Plantae, Sub-reino Biliphyta, Filo Rhodophyta, Subfilo Eurhodophytina, Classe Florideophyceae, Subclasse Rhodymeniophycidae, Ordem Gracilariales, Família Gracilariaceae, Subfamília Gracilarioideae, Tribo Gracilarieae, Gênero Gracilarieae, espécie *Gracilaria birdiae* E.M.Plastino & E.C.Oliveira (ALGAEBASE, 2020b).

Quanto a classificação taxonômica da espécie estudada, este trabalho abordará principalmente os grupos de maior relevância econômica e social para a região objeto de estudo, a saber o litoral oriental do Estado do Rio Grande do Norte. Por exemplo, o Filo Rhodophyta por ser o que engloba a maior quantidade de espécies, a família Gracilariaceae que engloba o gênero Gracilarieae que possui grande interesse comercial e

¹ Em dezembro de 2018, esta espécie – *Gracilaria birdiae* –, sofreu uma alteração em sua nomenclatura passando a se chamar *Crassiphycus birdiae*. Desta forma, onde se lê *Gracilaria birdiae* nesta tese, trata-se, portanto, da espécie *Crassiphycus birdiae*.

a espécie *Gracilaria birdiae* que é amplamente distribuída e cultivada na região de estudo desta tese.

De acordo com Norton *et al.* (1996), o Filo Rhodophyta representa a maior diversidade de espécies dentro das macroalgas marinhas, podendo chegar a 20.000 espécies. As algas vermelhas, pertencentes a este Filo, são organismos principalmente marinhos, encontrados em águas continentais, desde regiões tropicais até regiões polares. Inúmeros trabalhos na área da Ficologia têm encontrado uma grande quantidade de espécies crípticas, ou seja, espécies em que o reconhecimento não é evidente e depende geralmente de comparações baseadas em biologia molecular; fato que corrobora para que o Filo Rhodophyta permaneça liderando em diversidade de espécies (Costa, 2013). Estima-se existir entre 500 a 600 gêneros de algas vermelhas, representadas por mais de 6000 espécies (GRAHAM, L.E; WILCOX, 2009).

Neste Filo encontra-se a família Gracilariaceae que apresenta inúmeras “algas gracilarióides”. Este termo “algas gracilarióides” tem sido empregado na literatura para designar as espécies da família Gracilariaceae (Gracilariales, Rhodophyta) pertencentes aos gêneros *Gracilaria* (AYRES-OSTROCK, 2014) que são amplamente distribuídos ao longo da costa brasileira. Estes possuem grande importância econômica e ecológica, determinando assim uma necessidade de identificação correta das espécies (COSTA, 2013). O gênero de algas vermelhas, *Gracilaria*, se destaca por possuir a maior diversidade de espécies, concentradas na região intertropical decrescendo em direção aos pólos (OLIVEIRA; PLASTINO, 1994). Neste gênero de algas encontra-se a espécie de macroalga objeto de estudo desta tese, a *Gracilaria birdiae*.

As espécies deste grupo compartilham características morfológicas em comum, o que dificulta a identificação dos organismos. Para facilitar essa identificação, os estudos e as técnicas para melhorar a determinação dos gêneros e espécies tem evoluído ao longo do tempo, tornando-se mais frequentes nas pesquisas. Para realizar a caracterização das espécies são utilizadas metodologias como: a contagem do número de cromossomos, restrita para algumas espécies; testes de cruzamento e a partir da década de 1990, o uso de marcadores moleculares com base na comparação de sequências homólogas de DNA vêm sendo amplamente empregados nos estudos sobre diversidade genética e muito utilizado na solução de problemas taxonômicos (AYRES-OSTROCK, 2014 e COSTA, 2013).

Para Ayres-Ostrock (2014), a taxonomia das “algas gracilarióides” é complexa devido a presença de poucas características diagnósticas utilizadas na identificação das espécies, a plasticidade morfológica observada no grupo e a grande diversidade de

espécies. Para facilitar este trabalho taxonômico, a avaliação da diversidade genética das macroalgas vem sendo incrementada com os avanços na tecnologia de marcadores moleculares e equipamentos relacionados; tornando esse processo de identificação mais rápido e preciso através da agilidade com que se faz a comparação das sequências de genoma de uma ampla amostragem de espécies, favorecendo assim na identificação de diferentes Gracilariaceae.

No Brasil, são descritas em torno de 25 espécies do gênero *Gracilaria*, presentes da costa do estado do Maranhão até o estado do Rio Grande do Sul, estas espécies ocupam os bancos naturais ao longo do litoral nordestino (COSTA, 2013). Algumas espécies deste gênero são de grande interesse comercial para a indústria em virtude da larga aplicabilidade de seus produtos, como os ficocolóides (PORSE; RUDOLPH, 2017; FERDOUSE *et al.*, 2018). Uma dessas espécies se destaca por seu atrativo comercial, é a macroalga *Gracilaria birdiae*, descrita a seguir.

1.1.1 Caracterização da Espécie *Gracilaria birdiae*

A espécie *Gracilaria birdiae* foi descrita por Plastino & E. C. Oliveira a partir das águas tropicais brasileiras, com base em uma comparação crítica com várias espécies aparentemente relacionadas (PLASTINO & OLIVEIRA, 2002). Morfologicamente, esta espécie apresenta talo de até 46 cm de altura, terete (cilíndrico), até 2,3 mm de largura, com 2 a 4 ordens de ramificação, microcistidiado, composto por um córtex com duas camadas de células subquadradas. Popularmente, entre as comunidades costeiras esta alga é conhecida como “macarrão” (SANTOS, 2015). A Figura 1 apresenta a alga *Gracilaria birdiae* colhida de bancos naturais no nordeste brasileiro.



Figura 1 - Macroalga *Gracilaria birdiae*
Fonte: Arquivo pessoal

Esta espécie habita em substratos rochosos entre marés ou submarés, na costa do nordeste brasileiro desde estado do Ceará até o Espírito Santo, durante todo o ano (PLASTINO & OLIVEIRA, 2002). Suas populações são encontradas em diferentes latitudes, e, portanto, estão expostas a distintas irradiâncias e temperaturas.

Quanto a sua reprodução, a mesma ocorre a partir de esporos, produzidos pelos espermatângios que são as estruturas reprodutivas localizadas em todo o talo, exceto nas pontas dos ramos e na base do talo (PLASTINO & OLIVEIRA, 2002). A descrição morfológica detalhada da anatomia reprodutiva de *Gracilaria birdiae* encontra-se em Plastino, E.M. & Oliveira (2002), assim como dados de alguns aspectos fisiológicos e ultra estruturais.

A tarefa de identificação das algas é complexa, conforme citado anteriormente, pois decorrem de uma morfologia, anatomia vegetativa e reprodutiva, basicamente convergentes e pela presença de espécies crípticas – grupo de espécies que são

morfologicamente idênticas, isoladas reprodutivamente e muito frequentemente ocorrem na mesma área geográfica – (COSTA, 2013).

O processo de identificação das algas gracilarióides tem sido longo e trabalhoso, incluindo estudos em populações naturais e in vitro; e foi possível graças aos testes de cruzamento que permitiram reconhecer e identificar as populações distantes de *Gracilaria birdiae* (AYRES-OSTROCK, 2014).

1.1.2 Taxonomia da espécie *Gracilaria birdiae*

Dentro do contexto de estudos de identificação das espécies de macroalgas que habitam a costa brasileira, a espécie *Gracilaria birdiae* sofreu alteração em sua taxonomia, passando a se chamar *Crassiphycus birdiae* (GUIRY *et al.*, 2018), mantem-se nesta tese o uso da nomenclatura *Gracilaria birdiae*. De acordo com a nomenclatura atual, a *Gracilaria birdiae* corresponde a seguinte classificação, conforme apresentado na Figura 2:

Classificação	
Império	Eukaryota
Reino	Plantae
Sub-reino	Biliphyta
Filo	Rhodophyta
Subfilo	Eurhodophytina
Classe	Florideophyceae
Subclasse	Rhodymeniophycidae
Ordem	Gracilariales
Família	Gracilariaceae
Subfamília	Gracilarioideae
Tribo	Gracilarieae
Gênero	Crassiphycus

Figura 2 - Classificação da *Crassiphycus birdiae*.

Fonte: Elaboração própria baseado em Guiry *et al.*, 2018.

De acordo com Gurgel *et al.* (2018), que propuseram a alteração na nomenclatura da espécie *Gracilaria birdiae*, a maioria das espécies da ordem Gracilariales é caracterizada por plantas exibindo talos robustos, cilíndricos a planos eretos, variando entre alguns centímetros a 40 cm de altura. Estes organismos são membros conspícuos das comunidades bentônicas marinhas, desempenhando papéis ecológicos relevantes nos ecossistemas marinhos costeiros (THOMSEN *et al.*, 2013). A ordem Gracilariales é uma ordem de macroalgas vermelhas, sendo as mesmas a principal fonte global de Ágar, um hidrocolóide que conforma uma mistura heterogênea de dois polissacarídeos, agarose e agarpectina, o qual tem importante valor econômico considerado um ficocolóide natural encontrado no ambiente marinho (GURGEL *et al.*, 2018). Os ficocolóides são polissacarídeos formadores de gel, solúveis em água, produzidos por várias macroalgas e amplamente usados nas indústrias microbiológica, farmacêutica, química, médica, molecular e alimentícia (WHITE, W. L.; WILSON, 2015).

Na década que antecede 2018, muitas espécies distintas foram sequenciadas, e esta grande amostragem sistemática molecular permitiu uma reavaliação da sistemática e filogenia dos Gracilariales, a qual foi feita por Gurgel *et al.*, 2018. Estes autores propuseram um sistema de classificação natural e estável para a ordem Gracilariales, reconhecendo as principais linhagens evolutivas nesta ordem de algas vermelhas economicamente importante. O proposto faz uma classificação natural da ordem Gracilariales com base na análise da sequência de DNA *rbcL*, reconhecendo dois novos gêneros: o Agarophyton e; o Crassa, este último posteriormente reconhecido como Crassiphycus (GUIRY *et al.*, 2018). Com base em novas sequências de DNA *rbcL*, e junto com uma reavaliação de estudos morfológicos e filogenéticos moleculares comparativos publicados, Gurgel *et al.* (2018) argumentam que os gêneros Hydropuntia, Agarophyton e Crassiphycus representam linhagens evolutivas distintas na família Gracilariaceae e propõe a nova classificação para a ordem Gracilariales.

Esta nova classificação incorpora a compreensão mais atual da história evolutiva da ordem, estabelecendo um sistema de classificação natural, estável e fornece a base para o reconhecimento de classificações intrafamiliares, com o esquema de classificação que reconcilia todos os estudos filogenéticos moleculares publicados até 2018 (GURGEL *et al.*, 2018). Esse esquema taxonômico proposto para os Gracilariales servirá tanto como uma classificação natural da ordem quanto como uma estrutura nomenclatural sobre a qual os táxons intrafamiliares são reconhecidos.

Diante do exposto, o novo gênero *Crassiphycus*, identificado por Gurgel *et al.* (2018), possui características semelhantes ao gênero *Gracilaria*, pois ambos fazem

parte da ordem Gracilariales que é uma ordem de grande interesse comercial entre as algas vermelhas (GURGEL *et al.*, 2018). A espécie *Crassiphycus birdiae* (E.Plastino & E.C.Oliveira) Gurgel, J.N.Norris & Fredericq, pertencente ao novo gênero, é cultivada artesanalmente no nordeste brasileiro e conhecida como *Gracilaria birdiae*.

1.1.3 Caracterização Bioquímica da *Gracilaria birdiae*

As algas marinhas desenvolveram estratégias de defesa para sobreviver em um ambiente bastante competitivo, culminando em uma elevada diversidade química-estrutural, partindo de diferentes vias metabólicas (CARDOZO *et al.*, 2007).

De acordo com Holanda (2016), as macroalgas vermelhas são ricas em polissacarídeos sulfatados que são encontrados na matriz mucilaginosa das algas e as atividades biológicas destes, possivelmente, conferem às algas flexibilidade para que elas cresçam no meio aquoso e rigidez suficiente para crescer verticalmente, capturando luz solar e nutrientes. Estes polissacarídeos atuam também como agentes protetores das adversidades do meio, protegendo os organismos nas variações da maré contra a desidratação, uma vez que muitas algas ficam expostas nos períodos de maré baixa, na região entre marés.

O potencial dos compostos bioativos das macroalgas tem ampla aplicabilidade e tem despertado o interesse na comunidade científica devido as inúmeras aplicações farmacêuticas, nutracêuticas e cosmeceúticas (QIN, 2018). Torres (2017) realizou um levantamento bibliográfico dos trabalhos sobre o potencial biológico das espécies de *Gracilaria*, de 1980 a 2016 e 385 artigos foram encontrados. O interesse pelo potencial biológico teve um aumento considerável entre 2005 a 2013, saltando de 9 para 49 artigos publicados anualmente. Nos anos seguintes entre 2014 a 2016, o que se observou foi uma estabilização nas publicações com 43 artigos por ano.

De acordo com os trabalhos observados neste levantamento bibliográfico, das 186 espécies de *Gracilaria* somente 46, foram avaliadas em algum ensaio biológico (bioensaio). Esses bioensaios foram divididos em dois grupos: i) ensaios relacionados à saúde humana e ii) ensaios relacionados às diversas bioatividades das espécies de algas do gênero *Gracilaria*. Nos ensaios de bioatividades ou atividades biológicas, com aplicações na agricultura, somente 9 espécies de *Gracilaria* foram testadas, o que representa menos de 5% do total das espécies do gênero e a maior parte dos artigos avalia apenas os extratos das espécies de macroalgas, poucos artigos fazem o

isolamento das substâncias químicas responsáveis pelas atividades biológicas e/ou poucos apresentam a identificação da substância responsável por tal bioatividade. Já os artigos referentes aos ensaios relacionados à saúde humana foram os que mais apresentaram as identificações das substâncias ligadas à bioatividade, como, por exemplo, as oxilipinas que apresentaram atividades anti-inflamatórias e polissacarídeos sulfatados com atividades imunoestimulantes.

Diferentes atividades biológicas têm sido descritas para os polissacarídeos de *Gracilaria*, como, por exemplo, antioxidantes (SOUZA *et al.*, 2012), antiviral (MAZUMDER *et al.*, 2002), anti-inflamatória (COURA *et al.* (2012), antitumoral (JIANG *et al.*, 2014), entre outras. Os substituintes nos polissacarídeos parecem ser importantes para as diferentes bioatividades dessas substâncias, como por exemplo maior teor de enxofre pode implicar em maior atividade antiviral (JIAO *et al.*, 2011).

Quimicamente, o gênero *Gracilaria* destaca-se pela diversidade, possuindo mais de 1.500 compostos descritos, destacando-se entre as algas vermelhas e em relação aos outros grupos de algas verdes e pardas (MASCHEK; BAKER, 2008; SANTOS, 2015).

As espécies de *Gracilaria* são de grande importância econômica, porém são poucos os trabalhos científicos que tratam sobre sua composição química de forma detalhada. Torres (2017) avaliou o perfil químico de espécies nativas (*Gracilaria caudata*, *Gracilaria domingensis* e *Gracilaria birdiae*) do gênero *Gracilaria* com interesse econômico. As algas deste gênero apresentaram, geralmente, uma composição química semelhante, com as mesmas classes principais de metabólitos: alcanos, ácidos graxos livres, açúcares livres, ácidos sulfônicos, aminoácidos livres, esteróis, heterosídeos, lipídios polares, monoacilgliceróis, polissacarídeos sulfatados, aminoácidos tipo micoporina e sais halogenados. Essa combinação de compostos indica grande diversidade química para espécies de *Gracilaria*, o que amplia o interesse sobre o gênero.

As espécies de *Gracilaria* ganham importância em estudos voltados à avaliação do seu potencial biológico em virtude da sua grande biodiversidade e possibilidades de aplicações em diversas áreas do conhecimento (WHITE, W. L.; WILSON, 2015). No entanto, carecem de estudos detalhados sobre sua caracterização química e isolamento de substâncias associadas com o seu potencial biológico, faltam estudos fitoquímicos para maioria das espécies de *Gracilaria* e estes estudos permitem o conhecimento sobre a química dessas espécies, permitem a descoberta de novas substâncias ou novas aplicações para aquelas já conhecidas. Entre 1970 e 2016 foram publicados 72 artigos sobre estudos fitoquímicos com identificação de substâncias, ou seja, uma média de 1,46

artigo publicado por ano, neste período apenas 21 das 186 espécies do gênero *Gracilaria* foram analisadas com ênfase em uma classe química específica (TORRES, 2017).

A maior parte dos trabalhos, ao analisar quimicamente o gênero *Gracilaria*, se atém aos polissacarídeos sulfatados, devido especialmente ao grande atrativo econômico do Ágar. Outros metabólitos como proteínas, carboidratos, fibras, pigmentos (carotenóides, clorofila *a*, ficobiliproteínas) e ácidos graxos são estudados mais frequentemente em trabalhos com abordagens fisiológicas, ecológicas e nutricionais (TORRES, 2017). Com exceção destes estudos, que são mais voltados para metabolismo primário, poucos artigos são voltados para a caracterização química ou isolamento de metabólitos secundários (CARDOZO *et al.*, 2007) e de fato, observa-se uma inexistência de publicação sobre a composição química da *Gracilaria birdiae*, no período compreendido entre 1970 a 2006, aparecendo em 2011 duas publicações: Souza *et al.* (2011) analisando o potencial antioxidante de duas algas vermelhas (*Gracilaria birdiae* e *Gracilaria cornea*) da costa brasileira e Cardozo *et al.* (2011) realizando análises de compostos foto protetores em algas vermelhas (*Gracilaria birdiae*, *Gracilaria domingensis* e *Gracilaria tenuistipitata*) também do litoral brasileiro. Este último trabalho realizou estudos qualitativos e quantitativos de aminoácidos semelhantes a micosporina (MAAs) em três espécies do gênero *Gracilaria* e encontrou níveis elevados destes aminoácidos, cerca de 150 vezes maiores nas espécies coletadas do que nas espécies cultivadas *in vitro* (*Gracilaria tenuistipitata*), revelando que as espécies *Gracilaria birdiae* e *Gracilaria domingensis* apresentam potencial fonte para exploração econômica de MAAs.

Os aminoácidos tipo micosporina (MAAs, do inglês mycosporine amino acids) são produtos do metabolismo secundário sintetizados por produtores primários, sendo as macroalgas vermelhas aqueles em que são detectadas as maiores concentrações (PAULA, 2017) e estes compostos são usados pelos organismos nos ecossistemas aquáticos e terrestres contra os efeitos deletérios da radiação ultravioleta – RUV, sendo o acúmulo de MAAs que absorvem a RUV, um dos mecanismos de defesa criados pelos organismos para evitar os danos da RUV (MARQUES, 2015).

Marques (2015) considerando o importante papel desempenhado pelos MAAs na fisiologia e bioquímica celular das algas, seja atuando como protetoras de RUV ou como antioxidantes, expandiu o conhecimento sobre a ocorrência e distribuição dos MAAs em macroalgas brasileiras, desenvolvendo modernos procedimentos analíticos de isolamento para gerar padrões de qualificação e quantificação de MAAs em extratos de algas. Neste estudo, as Rhodophytas apresentaram níveis de MAAs superiores às Phaeophytas (algas marrons), Chlorophyta (algas verdes). Algumas espécies

apresentaram-se como importantes fontes de MAAs com possíveis usos pela indústria para obtenção de compostos puros ou para a utilização de seus extratos como ingredientes de formulações de filtros solares.

Analisando quimicamente a espécie *Gracilaria birdiae*, Andrade Neto (2015) que considera o potencial de produção de etanol a partir da macroalga *Gracilaria birdiae* cultivada, encontrou na análise da composição centesimal: 10% de proteína e 1,21% de lipídeos. De acordo com a literatura, o teor de proteínas entre as espécies do gênero *Gracilaria* varia entre 5,18 a 26,71 g/100 g, com média de 12,05 g/100 g e os teores de lipídios totais varia entre 0,26 a 3,30 g/100 g, com média de 1,55 g/100 g (TORRES, 2017).

De acordo Gressler *et al.* (2010) ao analisar os teores de lipídios, ácidos graxos, proteínas, aminoácidos e cinzas em quatro espécies de algas vermelhas brasileiras (*Laurencia filiformis*, *Laurencia intricata*, *Gracilaria domingensis* e *Gracilaria birdiae*) pertencentes ao Filo Rhodophyta, coletadas no Estado do Espírito Santo/Brasil e submetidas à investigação quanto à sua composição bioquímica (ácidos graxos, lipídios totais, proteínas solúveis, aminoácido e cinza), obteve-se os seguintes resultados: o conteúdo total de lipídios (% peso seco) variou de 1,1% a 6,2%; ácido graxo de 0,7% a 1,0%; proteína solúvel de 4,6% a 18,3%, aminoácidos de 6,7% a 11,3% e cinzas de 22,5% a 38,4%. Os autores ao avaliarem a composição, observaram que as quatro espécies de algas se apresentam como fontes potenciais de proteínas, aminoácidos, lipídios e ácidos graxos essenciais da dieta para humanos e animais.

Em linhas gerais, as macroalgas apresentam alto teor de água (90% em peso fresco), carboidratos (25–50% em peso seco), proteínas (7–15% em peso seco) e baixo teor de lipídios (1–5% em peso seco) Sudhakar *et al.* (2018). Quanto ao conteúdo mineral das algas marinhas, estas possuem um nível mais alto que àqueles encontrados em plantas terrestres e produtos animais (RUPÉREZ, 2002); MAEHRE *et al.*, 2014).

De acordo com a literatura, os valores de sais minerais encontrados para o gênero *Gracilaria* variam entre 4,04 a 53,40 g/100 g, com média de 26,90 g/100 g (TORRES, 2017). Fazendo a caracterização das algas quanto a presença de sais, Andrade Neto (2015) analisou os teores de cálcio, magnésio, sódio e potássio. O teor mais elevado encontrado foi o de potássio com cerca de 18 g/100 g de biomassa. Geralmente, cloreto de sódio e cloreto de potássio são os principais sais encontrados nas algas (TORRES, 2017). Apesar da água do mar ser rica em sódio, algumas algas marinhas acabam acumulando mais potássio que sódio, variando a relação Na⁺/K⁺. Devido a esse alto teor de sal, algumas algas marinhas têm sido recomendadas em substituição

ao sal marinho na alimentação (MAGNUSSON *et al.*, 2016). Analisando os micronutrientes cobaltos, cromo, níquel e zinco que são essenciais para o bom funcionamento dos sistemas vivos, atuando na maioria dos casos, como cofatores enzimáticos, o microelemento em maior concentração foi o zinco com 1,5 mg/100 g de biomassa (ANDRADE NETO, 2015).

1.2 Algas Marinhas e suas Aplicações

As algas marinhas são usadas pela humanidade desde a pré-história (DILLEYHAY *et al.* 2008 e GUILLEMIN *et al.* 2014) como alimento, medicamento, cosmético, fertilizante, entre outras aplicações (RIOUX; TURGEON, 2015; WHITE; WILSON, 2015). São consumidas como alimento, principalmente na Ásia, onde fornecem várias matérias-primas para as indústrias alimentícias e farmacêuticas, como hidrocolóides (Ágar, carragena e alginatos), pigmentos, vitaminas, micro minerais (selênio, cromo, níquel, arsênio) e substâncias prebióticas na forma de carboidratos complexos (MAKKAR *et al.*, 2016).

As macroalgas tem sido cultivadas cada vez mais visando atender um portfólio diversificado de produtos fora dos mercados tradicionais de alimentos para humanos e ficocolóides (MAGNUSSON *et al.*, 2016). Com o avanço do conhecimento sobre os benéficos e possíveis produtos de serem obtidos a partir do emprego das algas, estudos nesse campo aumentaram de interesse e conseqüentemente resultaram na ampliação das aplicações das algas marinhas em diversos setores da economia (CHAPMAN; CHAPMAN, 1980; MCHUGH, 2003; RIOUX, L.; TURGEON, 2015; WHITE; WILSON, 2015; QIN, 2018). Dada sua importância ambiental e econômica, associado às inúmeras aplicações, as algas marinhas são consideradas um importante recurso marinho disponível (LAGO *et al.*, 2019; OECD/IEA, 2017). Tal recurso é produzido a custos baixos e rico em diversos compostos bioativos como lipídios, proteínas, carboidratos, aminoácidos, fitormônios, osmoprotetores, nutrientes minerais e compostos antimicrobianos amplamente utilizados pelas indústrias nos mais variados produtos (WHITE; WILSON, 2015).

A maior parte da produção de macroalgas destina-se à alimentação humana, a indústria de alimentos utiliza cerca de 80% de toda a produção mundial White; Wilson (2015), sendo o continente asiático os maiores produtores e consumidores globais de algas marinhas (FAO, 2020). Além de todas as propriedades biológicas proporcionadas

pelas macroalgas, destaca-se a sua utilização na alimentação como fonte de sal. Apesar da água do mar ser rica em sódio, algumas algas marinhas acabam acumulando mais potássio que sódio, variando a relação sódio/potássio. Devido a esse alto teor de sal, algumas algas marinhas têm sido propostas como substituinte do sal comercial na alimentação (MAGNUSSON *et al.*, 2016).

Na agricultura, encontram-se registros históricos mostrando que o uso de algas marinhas na agricultura é uma prática antiga (CHAPMAN; CHAPMAN, 1980). Isso envolve seu uso não apenas como alimento para animais, mas também como adubo para o solo (CHAPMAN; CHAPMAN, 1980); MAKKAR *et al.*, 2016). As macroalgas produzem um biofertilizante de excelente qualidade, promovendo o crescimento e aumento de produtividade das culturas (MCHUGH, 2003; QIN, 2018; MUKHERJEE; PATEL, 2020; GELLI, 2019). O uso dos biofertilizantes proporciona melhores características físicas, químicas e biológicas no solo ou substrato utilizados para a produção de mudas, além de auxiliar no controle de pragas e doenças, neste sentido Araújo (2017) utilizou algas marinhas como bioestimulante no crescimento inicial de espécies florestais da Caatinga.

Na aquicultura integrada, observa-se vários estudos, realizados no estado do Rio Grande do Norte, com a espécie *Gracilaria birdiae* sendo testada em alguns cultivos experimentais em estuários (MARINHO-SORIANO *et al.*, 2006), em consórcios com camarão (OLIVEIRA, 2007; MARINHO-SORIANO *et al.*, 2009) e no mar (BEZERRA; MARINHO-SORIANO, 2010).

Na medicina, o relato de uso com fins terapêuticos das algas já é antigo (CHAPMAN; CHAPMAN, 1980). Pesquisas na área descobriram certos compostos bioativos que possuem efeitos antioxidante, anticoagulante, antitrombótico, anti-inflamatório, antitumoral, antiproliferação, anticâncer, antimetastático, antivírus, efeito inibitório sobre parasitas, efeitos antidepressivos, efeitos imunoestimulantes, efeitos protetores no sistema nervoso, efeitos terapêuticos em cirurgia e lesão cerebral (WHITE; WILSON, 2015), estes achados científicos vem apontando o promissor uso das algas marinhas na indústria farmacêutica. Um destes usos promissores referem-se às propriedades dos aminoácidos tipo micosporina (MAAs), que possuem ação de proteção solar e vêm sendo exploradas comercialmente como produtos para proteção da pele e proteção de materiais não biológicos, como aditivos fotoestabilizadores em indústrias de tintas, plásticos e vernizes (MARQUES, 2015).

1.3 Interesse comercial

As algas marinhas ou macroalgas são organismos de importante papel na manutenção dos ecossistemas aquáticos por constituírem fonte de alimento para diversos organismos marinhos, produzem oxigênio e atuam na ciclagem de nutrientes (FRESHWATER *et al.* 1994; GRAHAM, L.E; WILCOX 2009).

Elas compõem uma biomassa que é considerada uma fonte promissora de recursos renováveis (LAGO *et al.*, 2019). Entende-se por biomassa, a massa de organismos biológicos vivos em uma determinada área ou ecossistema em um determinado momento. Entre as inúmeras variedades de microorganismos, plantas e animais que formam a quantidade total de biomassa na terra, a biomassa marinha se apresenta de tal forma diversa e rica, com imenso potencial a ser desvendado, considerado ainda um recurso relativamente subexplorado, o que tem atraído muita atenção à medida que os recursos terrestres se exaurem (QIN, 2018).

O conhecimento do potencial econômico vinculado ao aproveitamento comercial da biomassa marinha, em especial a biomassa de macroalgas objeto deste estudo, está embasado nos seguintes fatores: aumento crescente população humana e seu padrão de vida e; aumento da demanda global por espaço, alimentos, energia e outros recursos naturais (QIN, 2018). Considerando que os oceanos cobrem mais de 70% da superfície do nosso planeta, a atenção global tem sido direcionada para a utilização dos recursos presentes nos mesmos, impulsionado pelo surgimento da chamada economia azul, está voltada para o desenvolvimento integral dos recursos e produtos oceânicos (CHARRETTE; SMITH, 2010).

Dentre estes produtos, destaca-se o Ágar - extraído de macroalgas, principalmente dos gêneros *Gracilaria* e *Gelidium*, ambos pertencentes ao Filo Rhodophyta - pela sua elevada importância econômica. O Ágar já é usado há bastante tempo pelo setor industrial (WHITE, W. L.; WILSON, 2015).

O *Gelidium* possui um gel de melhor qualidade, porém a *Gracilaria* tornou-se a alga preferida para a fabricação de Ágar de qualidade alimentar por ter sido mais facilmente cultivada no Chile e na Indonésia (QIN, 2018). Inicialmente as espécies de *Gracilaria* foram consideradas inadequadas para a produção de Ágar porque a força do gel produzido era muito baixa, mas uma inovação tecnológica desenvolvida na década de 1950 mostrou que o pré-tratamento da alga com *álcali* antes da extração produzia Ágar com alta resistência de gel, embora com um rendimento menor. Esta inovação expandiu

a indústria do Ágar e levou à colheita de uma variedade de espécies selvagens de *Gracilaria* no Chile, Argentina, Indonésia e Namíbia (SORIANO, 2017).

Para evitar a extinção das espécies nativas por meio da superexploração deste recurso, foram desenvolvidos métodos de cultivo para as algas *Gracilaria*, tanto em lagoas como em águas abertas de baías protegidas, pois as algas deste gênero preferem águas calmas e abrigadas de ondas (OLIVEIRA *et al.*, 2000). Neste sentido, o cultivo de algas marinhas vem recebendo cada vez mais atenção e deve ser promovido e monitorado para se alcançar um desenvolvimento da bioeconomia respeitando o clima e o meio ambiente (FAO, 2020).

Os produtos marinhos provenientes da biomassa algal possuem inúmeras aplicações comerciais, embora tradicionalmente usadas como vegetais marinhos, as algas são cada vez mais usadas por seus ricos conteúdos de substâncias bioativas. Estima-se que mais de 20.000 novas substâncias foram isoladas de organismos marinhos (Qin, 2018). Esta quantidade expressiva de substâncias adquiridas da biomassa marinha, deve-se ao fato de que o ambiente marinho fornece aos muitos organismos que nele habitam, estruturas genéticas e habitats de vida únicos, proporcionando o desenvolvimento de novas substâncias bioativas que podem ser utilizadas em alimentos, bebidas, farmacêuticos, cosméticos, têxtil, couro, eletrônica, medicina, biotecnologia e muitas outras indústrias (QIN, 2018).

As bioatividades das substâncias derivadas de algas marinhas encontraram aplicações em alimentos funcionais e nutracêuticos, cosméticos, materiais biomédicos, fertilizantes, produzindo benefícios para a saúde e demais áreas, como a agricultura orgânica que se beneficia dos fertilizantes naturais a base de algas (MCHUGH, 2003; QIN, 2018).

Embora se tenha conhecimento dos inúmeros benefícios proporcionados pelas algas, os dados precisos sobre a sua importância econômica em diferentes setores são difíceis de encontrar (WHITE, W. L.; WILSON, 2015). O banco de dados da FAO registra apenas os valores da exportação, não disponibiliza os valores da produção dos vários tipos de algas marinhas e produtos delas derivados, como grande parte das algas produzidas é consumida localmente, isso dá apenas uma noção do valor movimentado na comercialização (WHITE, W. L.; WILSON, 2015).

White; Wilson (2015) tentaram encontrar um valor econômico aproximado de acordo com o gênero das algas produzidas, para os cinco principais gêneros produzidos no mundo. Determinaram a faixa de preços no atacado para algas marinhas secas usando os valores encontrados da literatura e fizeram a conversão do peso úmido em

peso seco, gerando assim uma estimativa do valor no atacado da produção anual global de algas marinhas entre US\$ 10,1 e US\$ 16,1 bilhões, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Estimativa do valor de atacado dos principais cinco gêneros de algas produzidos no mundo.

	Faixa De Preço (Us\$)	Produção (T peso seco)	Estimativa Mais Baixa (Us\$)	Estimativa Mais Alta (Us\$)
<i>Eucheuma</i>	500-1500	2.236.896	1,118,448,338	3,355,345,013
<i>Laminaria</i>	5000-7000	1.184.365	5,921,828,000	8,290,559,200
<i>Undaria</i>	5000-7000	321.249	1,606,245,750	2,248,744,050
<i>Gracilaria</i>	500-1000	307.129	153,564,750	307,129,500
<i>Porphyra</i>	5000-7000	272.227	1,361,135,250	1,905,589,350
Total			10,161,222,088	16,107,367,113

Fonte: Elaboração própria baseado em White; Wilson (2015).

Os gêneros de algas apresentados na tabela anterior, configuram-se como os gêneros mais produzidos no mundo. Estes gêneros permanecem na liderança da produção mundial de algas, acrescidos da espécie *Kappaphycus alvarezii*, que teve seu cultivo aumentado na Indonésia e, com isso impulsionado a produção mundial (FAO, 2020). A Indonésia aumentou sua produção de algas cultivadas de menos de 4 milhões de toneladas em 2010 para mais de 11 milhões de toneladas em 2015 e mantendo-se nesse patamar nos anos seguintes, com o cultivo das espécies *Kappaphycus alvarezii* e *Eucheuma spp* que possuem um rápido crescimento e servem como matéria-prima para extração de carragena. Este ficocolóide foi o principal impulsionador do aumento da produção de algas cultivadas na década de 2010 neste país (FAO, 2020).

A produção mundial da aquicultura atingiu um novo recorde histórico em 2018, quando produziu-se 114,5 milhões de toneladas de peso vivo, as quais foram comercializadas por um total de US\$263.600 milhões de dólares. Esta produção aquícola foi composta por 82,1 milhões toneladas de animais aquáticos comercializados por US\$ 250,1 bilhões de dólares; 32,4 milhões de toneladas de algas aquáticas comercializadas por US\$ 13,3 bilhões de dólares e 26.000 toneladas de conchas e pérolas ornamentais que gerou US\$ 179.000 milhões de dólares (FAO, 2020).

Analisando-se os dados contidos na base de dados da FAO, observa-se um aumento gradativo do cultivo de algas marinhas. Para White; Wilson (2015) acontece uma tendência importante, tanto ecológica quanto econômica, em termos de sustentabilidade da indústria de algas marinhas que é o crescimento do cultivo de algas marinhas, denominado de Algacultura, bem como o declínio na colheita de algas marinhas selvagens.

Em 1995, 52% da produção mundial de algas era oriundo da colheita, em 2012 esse percentual se reduz para 4%, em 2016 o cultivo de algas produz 96,5% da produção mundial e em 2018 o cultivo é responsável por 97,1% da produção mundial de algas. Grande parte dessa mudança é estimulada pelo crescimento das indústrias de cultivo de algas marinhas das espécies *Laminaria*, *Undaria*, *Gracilaria* e *Porphyra* na China e *Kappaphycus* e *Euclima* na Indonésia (FAO, 2020).

Observa-se que o gênero *Gracilaria* destaca-se entre os cinco gêneros mais cultivados no mundo FAO (2020), em parte por sua ampla distribuição geográfica e capacidade de adaptação às variações de temperatura e salinidade, configurando-se como um importante gênero na produção mundial de Ágar possuindo por conseguinte uma grande importância econômica.

1.4 O Gênero *Gracilaria* e o seu atrativo comercial

O gênero *Gracilaria* pertencente ao Filo Rhodophyta, a classe Florideophyceae, ordem Gracilariales e a família Gracilariaceae. Foi descrito por Greville em 1830, incluindo somente quatro espécies. Mas a diversidade deste gênero mostrou-se abundante, tornando-o um dos maiores gêneros do Filo Rhodophyta (TORRES, 2017). De acordo com último levantamento realizado no AlgaeBase Algaebase (2020a), o gênero *Gracilaria* possui 287 nomes de espécies armazenados, destes 175 foram marcados como aceitos taxonomicamente com base na literatura sob o nome da espécie (M.D. GUIRY IN GUIRY, M.D. & GUIRY, 2020).

As espécies do gênero *Gracilaria* são consideradas a principal fonte de Ágar no mundo Torres *et al.* (2019), sendo cultivadas em vários países, são apontadas como ideais para o cultivo devido à qualidade de Ágar, rápido crescimento e fácil reprodução vegetativa (SORIANO, 2017). O gênero *Gracilaria* abrange toda a costa brasileira Costa (2013), conforme mostrado na Figura 3, é um gênero com elevado interesse comercial devido a qualidade do seu Ágar que é amplamente utilizado pelas indústrias (WHITE,

W. L.; WILSON , 2015). No Brasil, as espécies de *Gracilaria* são tradicionalmente colhidas em bancos naturais, durante a maré baixa, na costa do Nordeste e comercializadas para as indústrias processadoras de ficocolóides (OLIVEIRA, 1998; HAYASHI *et al.*, 2014; SORIANO, 2017).

A Figura 3 apresenta a distribuição do gênero *Gracilaria* pela costa brasileira.



Figura 3 - Distribuição do gênero *Gracilaria* pela costa brasileira
Fonte: Costa (2013)

1.4.1 A espécie *Gracilaria birdiae*

As espécies do gênero *Gracilaria* possuem grande interesse comercial fundamentado no seu potencial produtivo de Ágar. Este ficocolóide é muito utilizado pela indústria alimentícia mundial. A indústria de ficocolóides (Ágar, Carragena e Alginato) de algas marinhas, com relação à produção de Ágar, está com a produção baseada nas espécies cultivadas de *Gracilaria* (PORSE; RUDOLPH, 2017). Esta indústria cresce expressivamente, sem grandes dificuldades em garantir matérias-primas de algas

marinhas para esse crescimento, países como a China e Indonésia são capazes de aumentar consideravelmente a produção de agarófitas, baseados nas técnicas de cultivo avançadas, elevada capacidade de produção de Ágar e baixos custos de fabricação da China (PORSE; RUDOLPH, 2017). Diante deste potencial produtivo de Ágar, as espécies de *Gracilaria*, ganham destaque e se consolidam no cenário produtivo mundial de Ágar.

No Brasil, destaca-se a espécie *Gracilaria birdiae* como uma importante agarófita, esta espécie ocorre desde a costa do Estado do Ceará até a costa do Estado do Espírito Santo (PLASTINO & OLIVEIRA, 2002; COSTA, 2013). No estado do Rio Grande do Norte, a *Gracilaria birdiae* habita em leitos naturais, formados por substratos rochosos e recifes, naturalmente adequados para o estabelecimento e crescimento de algas marinhas (CARNEIRO *et al.*, 2011; SORIANO, 2017).

A colheita acontece durante as marés baixas, durante todo o ano, e o curto intervalo de tempo entre uma colheita e a próxima não é suficiente para permitir a regeneração completa dos bancos de algas. Este formato de colheita causa a diminuição gradativa dos estoques de algas na região (CARNEIRO, 2011). A coleta destas algas nos bancos ocorre de forma extrativista, sem nenhum controle de produção, sem respeitar o tempo de recuperação destes organismos, esta coleta é realizada por comunidades costeiras e possui importante papel na economia local. Porém no formato extrativista baseado na exploração excessiva associado aos baixos preços da alga, devido ao alto teor de impureza, causou um declínio na atividade a partir dos anos 1990. A queda da produção de algas e a perda de renda das comunidades costeiras, ao longo dos anos, evidenciou que o cultivo de algas era a solução para o problema da falta de matéria prima (SORIANO, 2017). Várias espécies eram coletadas nos bancos naturais como a *Gracilaria birdiae*, *Gracilaria cervicornis*, *Gracilaria caudata* e *Gracilaria dominicensis* (SORIANO, 2017), porém a *Gracilaria birdiae* se consolidou como a espécie mais adequada ao cultivo, através de projetos governamentais que tinham por objetivo evitar a superexploração dos bancos e promover emprego e renda nas comunidades costeiras (TORRES, 2017).

Para solucionar o problema da superexploração dos bancos naturais e promover o desenvolvimento socioeconômico das comunidades costeiras do nordeste, em 2001, a FAO e o governo brasileiro iniciaram um Projeto de Cooperação Técnica (TCP/BRA/0065) para implantar um cultivo sustentável de algas marinhas e beneficiar as comunidades costeiras dos estados do Rio Grande do Norte, Paraíba e Ceará (SANTOS, L. B., 2015). Esse projeto treinou pescadores para desenvolver essa nova

atividade, conscientizando-os sobre o cultivo de algas e seus benefícios, como mais uma fonte de renda para comunidade. O conhecimento acerca do cultivo foi disseminado entre os pescadores, porém foram as mulheres da comunidade que, mais adiante, abraçaram a ideia do cultivo (SANTOS, L. B., 2015). Em 2006, um novo projeto: Desenvolvimento para as Comunidades Costeiras – DCC (UTF/BRA/066/BRA) com o objetivo de consolidar e expandir o cultivo de algas, apresentou resultados animadores. Foi a partir desse projeto que as mulheres passaram a protagonizar o cultivo de algas, fundando a Associação de Maricultoras de Algas Marinhas – AMAR, no município de Rio do Fogo/RN, com a finalidade promover atividades que gerassem emprego e renda proporcionando uma vida melhor para as pessoas envolvidas na atividade (REBOURS *et al.*, 2014; BEZERRA; SORIANO, 2010).

Através do Projeto de Desenvolvimento de Comunidades Costeiras – DCC, as mulheres tiveram a oportunidade de mostrar sua capacidade para o empreendedorismo com autonomia, melhorando a autoestima e a recuperação da identidade feminina na comunidade. As mulheres que participam da Associação AMAR para o cultivo de algas, relatam mudanças positivas em suas vidas após a atividade de cultivo, para 71,4% das mulheres à independência financeira em relação aos maridos é a mudança mais significativa (SANTOS, L. B., 2015). Esse empoderamento feminino através da independência financeira foi reconhecido e premiado pela Organização das Nações Unidas – ONU – (ONU, 2018).

A ideia se multiplicou e outras associações de cultivadoras de algas foram criadas, compostas e gerenciadas, em sua maioria por mulheres, que tradicionalmente já faziam a colheita das algas como forma de complementar a renda (PIONER, 2016). No Rio Grande do Norte, foram criadas a Associação das Maricultoras de Rio do Fogo (AMAR) e a Associação de Maricultura e Beneficiamento de Algas de Pitangui (AMBAP). No estado do Ceará, a Associação dos Cultivadores e Cultivadoras de Algas de Maceió (Acalma) no município de Itapipoca/CE, Associação dos Produtores de Algas de Flecheiras e Guajiru (APAFG), Mulheres de Corpo & Alga (TORRES, 2017).

As associações realizam o processamento das algas, transformando-as em produtos alimentícios, cosméticos, artesanato e comercializam esses produtos à base de algas (REBOUÇAS, 2013). Observa-se, de forma muito persistente, a existência destas associações femininas para o cultivo de algas. Na praia da Barrinha, município de Icapuí/CE, existe a associação Mulheres de Corpo e Alga, que faz uso das algas do gênero *Gracilaria* para a fabricação dos produtos à base de algas (REBOUÇAS, 2013). O beneficiamento de algas acontece em pequena escala, de forma artesanal, com pouco

resíduo gerado, como o bagaço das algas marinhas, resultante da extração da farinha de algas (utilizado na produção de cosméticos e alimentos pelo grupo de mulheres), que antes não possuía destinação, passou a ser descartado espontaneamente na horta comunitária, o que ocasionou um crescimento mais rápido das hortaliças. A partir desta observação, as mulheres passaram a utilizar o resíduo das macroalgas na horta comunitária. Posteriormente, estes resíduos foram analisados em pesquisa realizada na Universidade do Estado do Rio Grande do Norte – UERN por Rebouças (2013).

Pode-se observar que as espécies de *Gracilaria* desempenham um importante papel econômico-social para as comunidades costeiras envolvidas no cultivo de algas no nordeste do Brasil. Os estudos relacionados a estas espécies são de grande interesse para estas populações, pois fornecem informações que proporcionam a melhoria do cultivo, melhoria na forma de exploração do recurso e agrega valor a este recurso natural, contribuindo assim para melhoria de vida destas comunidades (SANTOS, L. B., 2015; REBOURS *et al.*, 2014; SORIANO, 2017; TORRES, 2017).

1.5 O Cultivo das algas – Algacultura²

O cultivo de algas tem sido apontado como um importante aliado para atender as crescentes demandas por alimentos, rações, matérias-primas para diversas indústrias e como atividade capaz de proporcionar o desenvolvimento econômico social das comunidades costeiras (BEZERRA, 2008; REBOURS *et al.*, 2014; GELLI, 2019). Em virtude dessa ampla utilização das algas nas mais variadas indústrias, ocorre um consequente aumento na demanda por essa matéria prima (McHUGH, 2003). Apesar das macroalgas cultivadas representarem um tipo de biomassa relativamente novo no contexto industrial, as oportunidades de inovação e desenvolvimento de negócios a partir do cultivo e do aproveitamento integral dessa matéria-prima são grandes (BROCH *et al.*, 2016 e STÉVANT *et al.*, 2017).

² O termo Algacultura refere-se ao cultivo comercial de macroalgas (Reis *et al.*, 2017). Por vezes, o termo Maricultura é empregado no sentido do cultivo de algas, pois a Maricultura refere-se ao cultivo de organismos aquáticos marinhos e estuarinos, desde vegetais como as algas, crustáceos e moluscos, até vertebrados como peixes e répteis (FAO, 2010).

Na década de 2010, a indústria de macroalgas apresentou crescimento global a uma taxa de 7,7% ao ano, performance esta esperada para ter seguimento na década em curso (BROCH *et al.*, 2016).

Para atender esta demanda, o cultivo de algas ou Algacultura tem sido desenvolvido no mundo, fortemente alicerçado nos princípios da sustentabilidade, para atender diversos fatores:

- i) a limitação dos bancos naturais de macroalgas frente ao aumento da demanda;
- ii) o potencial de lucratividade presente na atividade;
- iii) a busca de trabalho e renda para as comunidades costeiras;
- iv) o estímulo a projetos de desenvolvimento industrial de países tropicais destinado a geração de emprego e renda nas áreas costeiras com baixo desenvolvimento social e vulnerabilidade ambiental (REBOURS *et al.*, 2014).

Nesse contexto, os desafios assentados no desenvolvimento do cultivo de macroalgas como fonte de biomassa destinada a diferentes usos, incluso a produção de biocombustível, exige o conhecimento das possíveis dificuldades e oportunidades encontradas na instalação de uma cadeia produtiva. Segundo Rebours *et al.* (2014), a estruturação da cadeia produtiva de macroalgas deve atender para os impactos socioeconômicos e ambientais, os custos associados e infraestrutura, bem como as políticas públicas regulatórias que precisam ser adotadas e os incentivos governamentais para este fim. Torna-se, portanto, de fundamental importância compreender que a promoção da sustentabilidade nesta atividade, exige além da viabilidade econômica, a viabilidade social, cultural, política e ambiental (REBOURS *et al.*, 2014).

Nessa perspectiva, o cultivo de algas desempenha um papel importante na subsistência, no emprego e no desenvolvimento econômico local das comunidades costeiras em muitos países em desenvolvimento, constituindo-se em alternativa viável para enfrentar os efeitos das mudanças climáticas sobre a produção agrícola e pecuária (FAO, 2020).

As macroalgas são consideradas um importante recurso renovável, as quais ofertam diversos produtos à humanidade (RIOUX; TURGEON, 2015; WHITE, W. L.; WILSON, 2015); MAKKAR *et al.*, 2016; QIN, 2018; SÁNCHEZ *et al.*, 2019).

Por muito tempo a exploração deste recurso aconteceu sem a devida preocupação com a sua sustentabilidade. A extração excessiva provocou consequências negativas à manutenção da prática de sua exploração comercial, o que promoveu redução

das espécies com maior potencial econômico (SORIANO, 2017). Com resultado, um novo olhar sobre a forma de exploração desses recursos passou a guiar esse setor, passando o mesmo a ser pensado não mais como uma opção econômica, mas também como uma alternativa econômica que pode adotar processos ecologicamente indicados, de forma que seja possível conciliar sua exploração e conservação de seus recursos (BEZERRA; MARINHO-SORIANO, 2010). Neste sentido, o cultivo oferece muitas vantagens sobre a exploração dos estoques naturais, como: maior produtividade, produção de uma espécie selecionada de acordo com interesse comercial, menor custo de processamento pós-colheita e produção ajustável à demanda do mercado (BEZERRA; SORIANO, 2010). Ressalta-se ainda que o cultivo de algas marinhas requer menor investimento quando comparado com outros cultivos da aquicultura, como camarão ou peixe, e pode até ser desenvolvido em associação com tais culturas, utilizando-se das mesmas instalações, minimizando o lançamento de poluentes de águas residuais (MARINHO-SORIANO *et al.*, 2009).

Pensando-se no cultivo como uma atividade econômica com vistas à conservação do recurso natural, o cultivo de macroalgas pode ser estruturado em três pontos principais: i) a escolha da espécie; ii) o método do cultivo; e, iii) colheita das macroalgas (FERNAND *et al.*, 2017).

A escolha da espécie deve ser baseada nos estudos de levantamento da flora marinha na área em que se pretende instalar o cultivo (OLIVEIRA *et al.* 2001). Estes levantamentos possibilitam caracterizar e classificar as espécies a partir de seu potencial econômico. Geralmente as espécies nativas em uma determinada área configuram-se como as mais apropriadas, considerando-se os fatores ambientais para seu crescimento na região (OLIVEIRA, 2007; MARINHO-SORIANO *et al.*, 2006). Para realizar a escolha da espécie deve-se levar em consideração o ciclo reprodutivo da espécie escolhida, pois a depender da escolha pode implicar em aumento de custos de produção (McHUGH, 2003).

Quanto ao **método de se cultivar algas**, de acordo com a literatura existem basicamente três métodos de cultivo de macroalgas:

- i) o cultivo offshore (ROESIJADI *et al.*, 2010; FERNAND *et al.*, 2017; GARCÍA-POZA *et al.*, 2020);
- ii) o cultivo onshore (MCHUGH, 2003; García-Poza *et al.*, 2020) e;
- iii) o cultivo integrado (MARINHO-SORIANO *et al.*, 2002, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2000; NEORI *et al.*, 2004; GARCÍA-POZA *et al.*, 2020).

A decisão sobre a escolha do método de cultivo, deve vir precedida da avaliação dos méritos de cada um, os quais necessitam de uma avaliação cuidadosa que leve em consideração fatores como a escala dos cultivos necessários para atender às necessidades de produção, custo, disponibilidade de espaço, nutrientes, impactos ambientais e competição com outros usos (ROESIJADI *et al.*, 2010).

No cultivo offshore, as macroalgas, são cultivadas diretamente na água do mar por meio do uso de estruturas (linhas, cordas, redes tubulares) ancoradas. Fixar algas marinhas em cordas, linhas ou redes é uma forma popular de cultivo, pois os custos de instalação e manutenção são baixos (FERNAND *et al.*, 2017). A técnica de fixar as algas nessas estruturas pode variar, pois diversas são as formas utilizadas (PETEIRO; FREIRE, 2012). As mudas podem ser presas diretamente nas cordas, por meio da Técnica de Transplante que consiste em produzir previamente as mudas em ambiente controlado, depois cultivá-las em tanques e, por fim, as pequenas mudas são transplantadas para cordas e levadas ao mar (PETEIRO *et al.*, 2014). O cultivo em cordas, pode variar quanto a disposição destas, podendo ser dispostas horizontal ou verticalmente (PETEIRO; FREIRE, 2012).

O cultivo onshore ocorre em sistemas fechados (por exemplo, em tanques, canais e lagoas) em que a água é retida sob agitação para manter as algas suspensas e expostas à luz (CURRIE, 2018 e HAFTING *et al.*, 2012). Tanques de diferentes dimensões e numerosas espécies podem ser encontrados juntos em um só lugar (HAFTING *et al.*, 2012). A principal vantagem do cultivo onshore é o monitoramento e a oportunidade de ajuste em tempo real das condições de cultivo (HAFTING *et al.*, 2015). Dessa forma, os fluxos de entrada e saída podem ser facilmente monitorados, pois a água do mar é bombeada para a costa e renovada dependendo das necessidades do cultivo. As entradas de nutrientes podem ser precisamente organizadas para maximizar a produção dos compostos bioativos de interesse, minimizando a descarga prejudicial ao meio ambiente (HAFTING *et al.*, 2015). Além disso, a qualidade e a quantidade de luz, assim como o fotoperíodo, podem ser controladas para atender aos interesses do produtor, protegendo, dessa forma os tanques ou monitorando a profundidade do tanque e a densidade das algas. Já a qualidade da luz pode ser controlada artificialmente pelo uso de coberturas de estufas e fontes de luz (HAFTING *et al.*, 2015). Assim como um controle mais fácil de pH e CO₂ (KIM *et al.*, 2014). A salinidade também é manipulada pela mistura de proporções de água doce e água do mar nos tanques terrestres (HAFTING *et al.*, 2015). Isso leva a obtenção de produtos dentro de um padrão, pois existe um melhor controle sobre as condições de cultivo (HAFTING *et al.*, 2012). As densidades de algas

marinhas podem ser manipuladas, maximizando os níveis de produção em espécies de crescimento rápido ou lento (HAFTING *et al.*, 2015).

O cultivo onshore iniciou-se nas décadas de 1970 a 1980, tentando produzir a espécie *Chondrus crispus* para extração de carragena (CRAIGIE; SHACKLOCK, 1995). Este cultivo apresenta algumas vantagens sobre o cultivo offshore como a facilidade de aplicação de nutrientes, prevenção de doenças e predação, além da possibilidade de se fazer integração com a aquicultura de outras espécies, para fornecer materiais residuais como um suprimento barato de nutrientes para as macroalgas (WEI *et al.*, 2013). Como desvantagens, o cultivo onshore apresenta altos custos de construção e manutenção de sua infraestrutura produtiva com trabalho operacional e energia. A disponibilidade de terras e água adequada para a produção, é limitada e, quando disponível, podem apresentar elevados custos de aquisição (HAFTING *et al.*, 2012).

O Cultivo integrado apresenta-se como uma alternativa aos efeitos danosos da produção intensiva da aquicultura de peixes, camarões, entre outros. Os estudos com métodos usando algas marinhas para tratar efluentes de sistemas de aquicultura fechados em terra, foram iniciados em meados da década de 1970 (TROELL *et al.*, 2003). Antes disso, as técnicas de cultivo integradas em ambientes marinhos e águas salobras originaram-se do desenvolvimento de métodos intensivos com macroalgas e organismos bivalves para tratamento de esgotos (TROELL *et al.*, 2003).

A rápida expansão dos sistemas intensivos de aquicultura para produção de peixes e camarão e a preocupação com os efeitos negativos sobre o meio ambiente de tais práticas, renovaram e aumentaram as pesquisas no desenvolvimento de técnicas integradas baseadas em algas marinhas (TROELL *et al.*, 2003). Vários estudos citados em Troell *et al.* (2003), demonstraram que as águas residuais da aquicultura intensiva e semi-intensiva são uma fonte de nutrientes adequada para a produção intensiva de algas marinhas, reduzindo, assim, o lançamento de nutrientes dissolvidos no meio ambiente (MARINHO-SORIANO *ET AL.*, 2009). A importância e os benefícios do cultivo integrado tem se difundido e se mostrado eficiente na produção e redução dos impactos causados pela aquicultura intensiva (CHOPIN *et al.*, 2001; NEORI *et al.*, 2004 e TROELL *et al.*, 2003).

De acordo com García-Poza *et al.* (2020), o cultivo de algas poderia ser combinado em uma Aquicultura Multitrófica Integrada (IMTA) a fim de resolver algumas questões ambientais da aquicultura, como a eutrofização da água devido à suplementação e excreção de rações (CHÁVEZ-CROOKER; OBREQUE-CONTRERAS, 2010 E GRANADA *et al.*, 2016). O modelo IMTA é caracterizado por criar espécies de diferentes

níveis tróficos na proximidade de um e de outro. Assim, os coprodutos (resíduos orgânicos e inorgânicos) de uma espécie cultivada são reciclados e servem como alimento para outras espécies. Este tipo de cultivo traz benefícios devido ao cultivo interligado por não haver necessidade de adicionar fertilizantes para promover o crescimento das algas, e a sustentabilidade e o lucro não estarem em risco (KNOWLER *et al.*, 2020).

O emprego da Aquicultura Multitrófica Integrada com algas marinhas apresenta-se como uma solução viável, mostrando possibilidades adicionais para a cultivo integrado incluindo uma produção diversificada, possível aumento de renda e benefícios sociais (CHOPIN *et al.*, 2001).

A colheita de macroalgas possui muitas especificidades a depender da espécie que será cultivada. As macroalgas, por serem organismos bentônicos, estão naturalmente, ligadas a substratos duros, mas algumas espécies também podem crescer flutuando nas camadas superiores da superfície marinha. As algas que crescem naturalmente sobre os bancos naturais são colhidas manualmente na zona subtidal ou em águas rasas (BEZERRA; SORIANO, 2010). Já em grandes cultivos ou para colher as algas ao longo da costa, a colheita acontece de forma mecanizada. Ainda na década de 1960 foram desenvolvidos os Barcos Skimmer³ para colher macroalgas *Laminaria digitata* longe da costa Francesa e Irlandesa (USDA, 2015; FERNAND *et al.*, 2017).

Os barcos para colheita de algas passaram por uma modernização, sendo projetados e desenvolvidos para essa finalidade, como o barco Taresund conforme mostrado na Figura 4. O Taresund é um moderno barco de colheita de algas marinhas, com mais de 17 metros e capacidade de carga para transportar 237 m³ de algas. Lançado em 2017, por uma empresa que acumula mais de 40 anos de experiência na colheita de algas na costa norueguesa (KURT, 2017).

A Figura 4 apresenta um moderno barco projetado com a finalidade de colher algas.

³ Os barcos skimmer foram desenvolvidos para colher macroalgas longe da costa, como a *Laminaria digitata*, este barco possui uma engrenagem chamada “Scoubidou” desenvolvida na década de 1960.



Figura 4 - Moderno barco desenvolvido para colheita de algas
Fonte: Hellesøy Verft, disponível em <https://maritimt.com/nb/batomtaler/taresund-112017>.
Acesso em 07/04/2021.

Esses modernos barcos após realizar a colheita e completar sua capacidade, fazem a transferência das algas para um navio cargueiro conforme se apresenta na Figura 5.

A Figura 5 apresenta a colheita mecanizada de algas *Laminaria hyperborea* para produção de alginato na Noruega.



Figura 5 - Colheita mecanizada de algas
Fonte: Hellesøy Verft, disponível em <https://www.froya.no/nyheter/nutrinar-tr%C3%A5ler-tareutenfor-sula>. Acesso em 07/04/2021.

Na costa da Noruega, modernos barcos de colheita com ancinhos, como pode ser observado na Figura 6, fazem a colheita da biomassa de macroalgas selvagens principalmente da espécie *Laminaria hyperborea*, conhecida como "kelps" que são algas gigantes que formam verdadeiras "florestas" submersas, colhidas em ciclos de cinco anos para que uma colheita ocorra novamente no mesmo local, proporcionando um descanso para recuperação da área. Por ano, são coletadas entre 150.000 a 170.000 toneladas de algas para a produção de alginato de excelente qualidade, empregado na fabricação de refrigerantes e medicamentos. Desde 1943, as algas marinhas têm sido objeto de considerável utilização industrial na Noruega com base na colheita de biomassa natural (STÉVANT *et al.*, 2017; STORTARE, 2017).

A Figura 6 apresenta a colheita mecanizada realizada por um barco dotado de ancinhos para fazer a colheita das algas selvagens, conhecidas como Kelps.



Figura 6 - Colheita mecanizada de *Laminaria hyperborea* na Noruega
Fonte: FMC Biopolymer, disponível em <https://www.industrienergi.no/nyhet/stortare-beste-vennkos-nod/>. Acesso em 07/04/2021.

A Algacultura é uma atividade que movimenta milhões de dólares anualmente, em 2018, esta atividade atingiu US\$ 13 300 milhões, com a produção mundial de 32,4 milhões de toneladas de algas em peso vivo (FAO, 2020). Já quando pondera-se em valores de mercado, há uma estimativa de que este mercado movimente em 2024 o valor de 9,98 bilhões de dólares (LEANDRO *et al.* (2019). Isto impulsionado pelo aumento do interesse pelas algas, seus produtos e suas aplicações nas mais variadas indústrias alimentícia, farmacêutica, cosmética e outras.

Os seres humanos usam cerca de 291 espécies de algas, destinadas principalmente a produção de alimentos, medicamentos, papel, fertilizantes e ração animal (WHITE, W. L.; WILSON, 2015). As principais macroalgas produzidas no mundo, conforme a FAO (2020), são a *Laminaria japonica* com a produção saltando de 5.380 toneladas em 2000 para 11 448 toneladas em 2018, a *Eucheuma spp* produzindo 215 toneladas em 2000 para 9.237 toneladas em 2018; Gracilarias (*Gracilaria spp.*) com produção de 55,5 toneladas em 2000 para 3.454 mil toneladas em 2018, Wakame (*Undaria pinnatifida*) produzindo 311 toneladas em 2000 e 2.320 mil toneladas em 2018, Luche (*Porphyra spp*) que em 2000 teve uma produção de 424 toneladas, saltando para mais de 2 mil toneladas em 2018 e a *Kappaphycus alvarezii* que em 2000 produziu 649 toneladas e 1 597 mil toneladas em 2018.

No período de 1990 a 2018, a produção mundial de macroalgas com valor econômico aumentou significativamente, saltando dos 3,8 milhões de t em 1990, para 32,4 milhões de t em 2018. E somente no século em curso, entre 2000 e 2018, essa produção mundial sai de um total 10,6 milhões de toneladas em 2000 para 32,4 milhões de toneladas em 2018 FAO (2020).

Os maiores produtores de macroalgas encontram-se no Leste e Sudeste Asiático FAO (2020). A Tabela 2 apresenta os principais países produtores de macroalgas.

Tabela 2 - Os principais países produtores de macroalgas.

Países	2000	2010	2018
	(em milhares de toneladas, peso vivo)		
China	8.227,6	12.179,9	18.505,7
Indonésia	205,2	3.915,0	9.320,3
República da Coreia	374,5	901,7	1.710,5
Filipinas	707	1.801,3	1.478,3
República democrática da Coreia	401	445,3	553
Japão	528,6	432,8	389,8
Malásia	16,1	207,9	174,1

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da FAO, 2020.

A China lidera essa produção entre os países asiáticos. Em 2018, produziu 18.505,7 mil toneladas de um total de 32,4 milhões de toneladas produzidas no mundo, ou seja, a China produziu 57,14% da produção global de macroalgas neste referido ano

(FAO, 2020). Desde 1991, os chineses vêm produzindo mais alimentos aquáticos cultivados do que os demais países do mundo. As políticas introduzidas no país, a partir de 2016, visam remodelar o setor de aquicultura nacional para adotar práticas mais sustentáveis, melhorar a qualidade do produto, aumentar eficiência e desempenho no uso dos recursos, bem como desempenhar um papel maior no desenvolvimento econômico rural, reduzindo a pobreza em regiões produtoras.

Com relação a mão de obra atuante no setor da pesca e aquicultura, estatisticamente, no período de 1990 a 2018, o total de pessoas envolvidas na pesca de captura sofreu um redução de 18% na participação da mão de obra do setor, caindo de 83% para 65%, enquanto as atividades de aquicultura que respondia por 17% da mão de obra em 1990 cresceu a 32% em 2018 (FAO, 2020). Estima-se que, em 2018, quase 60 milhões de pessoas trabalharam na pesca e na aquicultura no mundo; sendo 39 milhões de pessoas atuando na pesca e 20, 5 milhões de pessoas atuando na aquicultura. Percebe-se um célere aumento na quantidade de pessoas atuando na aquicultura em comparação a 2016, quando 19,3 milhões de pessoas atuaram nesta atividade (FAO, 2020).

O quantitativo de mão de obra que atuou no setor da pesca e aquicultura, em 2018, foi de 59, 51 milhões de pessoas, deste total 14% eram mulheres (FAO, 2020). Já a pesca somou 39 milhões de pessoas atuando nesta atividade, a qual somou um contingente de 12% de mulheres. Na aquicultura, esse quantitativo totaliza 20,5 milhões de pessoas, onde 19% eram de mulheres. Observou-se que nas etapas de processamento que se seguem após a colheita ou captura, um em cada dois trabalhadores do setor era mulher (FAO, 2020). Percebe-se, assim um célere aumento na quantidade de pessoas atuando na aquicultura, atividade predominantemente exercida por mulheres (FAO, 2020).

A maioria dos trabalhadores dedicados à produção primária da pesca e aquicultura, encontra-se nos países em desenvolvimento. São pescadores artesanais atuantes na aquicultura. O maior número destes trabalhadores concentram-se na Ásia, contidamente que responde por 85% do efetivo do setor, seguido pela África com 9%, as Américas 4% e na Europa e Oceania, ambos, com 1% da mão de obra que opera o setor (FAO, 2020).

1.6 Algas marinhas como biomassa para biocombustíveis

As algas marinhas ou macroalgas são consideradas recursos naturais promissores (ANDRADE *et al.*, 2020; LAGO *et al.*, 2019 e OECD/IEA, 2017). Sua biomassa é fonte de inúmeras substâncias, compondo um vasto portfólio de produtos, que são utilizados nas mais variadas indústrias, mais recentemente os biocombustíveis passaram a fazer parte deste portfólio (MCHUGH, 2003; RIOUX; TURGEON, 2015; WHITE, W. L.; WILSON, 2015; GAURAV *et al.*, 2017; QIN, 2018; SUDHAKAR *et al.*, 2018). Em meados de 2000, as macroalgas começaram a aparecer em estudos sobre a viabilidade para produção de biocombustíveis (ANDRADE NETO, 2015; GHADIRYANFAR *et al.*, 2016, SUDHAKAR *et al.*, 2018). A partir de 2010, observou-se um aumento nos estudos relacionando a biomassa algal com a produção de biocombustíveis (GOH; LEE, 2010, HARGREAVES, 2012, KHAMBHATY *et al.*, 2012, HARGREAVES *et al.*, 2013, KUMAR *et al.*, 2013, WEI *et al.*, 2013, TAN; LEE, 2014, KUMAR *et al.*, 2016, ADENIYI *et al.*, 2018), FERNAND *et al.*, 2017, GHADIRYANFAR *et al.*, 2016, ANDRADE *et al.*, 2020). Estes estudos surgem em meio a um contexto de mudanças climáticas ocasionadas pela intensa emissão de gases de efeito estufa – GEE e aquecimento global, em grande parte causado pelo uso massivo dos combustíveis fósseis. A necessidade iminente de fontes alternativas de combustíveis menos poluentes, baseados em fontes renováveis, como a biomassa, estimulam as pesquisas em bioenergia (OECD/IEA, 2017; IEA BIOENERGY, 2017).

A biomassa é um recurso renovável, pois seu conteúdo de energia provém basicamente do sol (SCARLAT *et al.*, 2015), sendo considerada o quarto maior recurso de energia disponível do mundo (HAYKIRI-ACMA; YAMAN, 2010). Neste cenário, desponta a bioenergia, definida como uma energia renovável produzida a partir de fontes naturais, capaz de substituir a energia fóssil (LAGO *et al.*, 2019). Considerando a biomassa como recurso renovável para produção de energia baseada nos princípios da bioenergia, a biomassa de macroalgas destaca-se como uma fonte promissora de biocombustíveis Wei *et al.* (2013), agregando diversas vantagens em sua produção (KRAAN, 2013).

A biomassa algal incorpora vantagens mais favoráveis à produção de biocombustíveis em relação a outras fontes de biomassas terrestres Wei *et al.* (2013), por não concorrer com a produção de alimentos, não fazer uso da terra agricultável, não depender de água, fertilizantes e defensivos (KRAAN, 2013). De acordo com estas vantagens, a biomassa algal, destaca-se como uma fonte promissora para produção de

biocombustíveis de terceira geração (GAURAV *et al.*, 2017), considerada como potencial matéria-prima para a produção de bioetanol em grande escala (FERNAND *et al.*, 2017).

Visando atender a produção dos biocombustíveis em larga escala, de forma sustentável e com base na bioenergia, é proposto o conceito de biorrefinaria, buscando-se criar sinergias entre o trabalho na produção de matéria-prima (biomassa) e as tecnologias eficientes para o processamento da biomassa, ao mesmo tempo em que é dada atenção aos fatores socioeconômicos e ambientais, incluindo a mitigação de GEE (DE JONG, E., VAN REE, R., KWANT, 2009). Para Scarlat; Dallemand (2019), o uso sustentável da biomassa, em combinações de processos e tecnologias para conversão de biomassa em alimentos, rações, energia e outros produtos de valor agregado com quantidade mínima de resíduos, oferece uma maneira de desenvolver uma economia industrial sustentável e capaz de reduzir o impacto nas mudanças climáticas.

Um dos principais motivos para o estabelecimento de biorrefinarias é a sustentabilidade (HINGSAMER; JUNGMEIER, 2019). Baseadas no princípio da sustentabilidade, as biorrefinarias devem ser avaliadas ao longo de toda a cadeia de valor em sua sustentabilidade ambiental, econômica e social, abrangendo todo o ciclo de vida desde a construção, operação e desmontagem (HINGSAMER; JUNGMEIER, 2019).

Existem várias configurações possíveis para as biorrefinarias, no entanto, o princípio norteador é a sustentabilidade, pautada no processamento sustentável de biomassa em um espectro de produtos comercializáveis e energia (DE JONG, E., VAN REE, R., KWANT, 2009). Esta definição de biorrefinaria inclui sistemas que podem existir como um conceito, uma instalação, um processo, uma planta ou mesmo um cluster de instalações. Por exemplo, o porto de Rotterdam possui um conjunto de instalações que atuam em conjunto e podem ser consideradas uma biorrefinaria (DE JONG, E., VAN REE, R., KWANT, 2009).

Ao propor um conceito de biorrefinaria de algas marinhas para o uso sustentável dos recursos marinhos, Balina *et al.* (2017) define uma biorrefinaria como a integração de diferentes processos de conversão de biomassa para produzir energia e produtos de valor agregado em uma única instalação. Dentro de um conceito de biorrefinaria para macroalgas, é possível a produção de inúmeros coprodutos comercializáveis extraídos das algas, como os produtos químicos e nutrientes (SADHUKHAN *et al.*, 2019), juntamente com a produção de biocombustíveis (Scarlat; Dallemand, 2019). De acordo com Jiang *et al.* (2016) as macroalgas podem ser exploradas para a produção de produtos

químicos de alto valor econômico e para a produção de biometano, bioetanol e biobutanol por meio de processos de conversão microbiológica.

De acordo com Balina *et al.* (2017), o conceito de biorrefinaria de macroalgas foi feito para ser diversificado e atender a muitos setores industriais. Este conceito baseado na diversificação de produtos de uma biorrefinaria de macroalgas aplica-se às biorrefinarias de microalgas. Como por exemplo, a proposta apresentada por Vieira (2018) relata uma biorrefinaria para microalgas, demonstrando o potencial desta biomassa para produção de biocombustíveis e para uso em biotecnologia e nanotecnologia. O processo desenhado pela pesquisadora do Instituto Virtual Internacional de Mudanças Climáticas (IVIG/COPPE/UFRJ) permite o aproveitamento industrial por completo, da microalga, onde o lipídio destina-se a produção do biocombustível, a biomassa residual para biogás, a proteína para alimentação animal, o pigmento (fucoxantina) para a indústria farmacêutica e nutracêutica, e por fim, a sílica destinada para a produção de compostos eletrônicos. Com este trabalho a autora conquistou o Prêmio Científico Mário Quartin Graça 2020, na categoria de Tecnologia e Ciências Naturais (PRÊMIO CIENTÍFICO MÁRIO QUARTIN GRAÇA, 2020).

Em comparação com as microalgas, as macroalgas parecem ter melhores perspectivas de biorrefinaria (Balina *et al.*, 2017), entre outros motivos porque a produção mundial de macroalgas é 100 vezes superior à produção de microalgas e são obtidos produtos de alto valor agregado, como nutracêuticos, ficocolóides e pigmentos, restando ainda a biomassa residual para a produção de biocombustíveis. O fato de a produção de macroalgas ser sazonal em algumas latitudes pode ser visto como uma oportunidade para a implantação de instalações complementares de microalgas para produção de biomassa (SÁNCHEZ *et al.*, 2019).

Diversos trabalhos apresentam outras propostas conceituais de biorrefinarias voltadas para os recursos marinhos, mais especificamente de biomassa de macro ou de microalgas, para produção de biocombustíveis e extração dos biocompostos. Fernand *et al.* (2017) fornece uma revisão das biorrefinarias baseadas em macroalgas com cultivo offshore e consequente conversão de biomassa em biocombustíveis líquidos para transporte. Assim como, Lehahn *et al.* (2016) apresenta o potencial global de biorrefinarias de macroalgas offshore e em águas rasas para fornecer alimentos, produtos químicos e energia, incluindo a viabilidade e sustentabilidade. Kumar *et al.* (2013), caracterizaram um teor maior de celulose na polpa residual de *Gracilaria verrucosa* após a extração do Ágar e posteriormente utilizou-a como matéria-prima para a produção de bioetanol, propondo uma abordagem de biorrefinaria a partir desta espécie de *Gracilaria*.

Baghel *et al.* (2014), ao realizar a caracterização de algas agarófitas no contexto de uma biorrefinaria, identificou os principais componentes destas algas marinhas, como corantes naturais (R-ficoeritrina (R-PE), R-ficocianina (R-PC)), minerais, proteínas, lipídios, celulose e Ágar, compostos de elevado valor comercial e que foram estimados em 15 diferentes algas agarófitas, esta descoberta consente a seleção e adição de valor de matéria-prima agarófita para uma biorrefinaria. E Goh; Lee (2010), relacionando a biomassa algal com a produção de biocombustíveis propõe uma biorrefinaria de bioetanol de terceira geração (BTG) visionária e conceitual baseada em macroalgas em Sabah, Malásia como base para o desenvolvimento renovável e sustentável.

Observa-se nos trabalhos citados anteriormente, uma abordagem sustentável para as biorefinarias e de fato a abordagem de uma biorrefinaria é considerada sustentável porque os processos produzem o mínimo de resíduos para o meio ambiente, diminuindo de fato a carga ambiental e a pressão sobre os serviços ecossistêmicos⁴. Desta forma, o conceito de biorrefinaria é uma aplicação técnica desse princípio em que a exploração da biomassa é aprimorada além da produção de bioenergia (BALINA *et al.*, 2017).

De acordo com Hingsamer; Jungmeier (2019), uma biorrefinaria pode usar todos os tipos de biomassa disponíveis da silvicultura, agricultura, aquicultura, resíduos da indústria e domésticos, incluindo os resíduos de madeira, safras agrícolas, resíduos orgânicos (derivados de plantas e animais), resíduos florestais e biomassa aquática. De forma que a disponibilidade de biomassa para uso de energia é uma questão chave para a implantação de bioenergia através das biorefinarias (SCARLAT; DALLEMAND, 2019).

Para Hingsamer; Jungmeier (2019), o conceito de biorrefinaria não é um conceito totalmente novo, muitas tecnologias tradicionais de conversão de biomassa, como as usadas na indústria de açúcar, amido, celulose e papel, podem ser consideradas, em parte, como biorrefinarias. Vários fatores econômicos e ambientais, como aquecimento global, conservação de energia, segurança de abastecimento e políticas agrícolas, também direcionaram essas indústrias a melhorar ainda mais suas operações assim como ocorre nas biorrefinarias. Nas biorrefinarias baseadas em biomassa de macroalgas, estas poderão ser transformadas em vários produtos para abastecer diversas indústrias.

⁴ Serviços ecossistêmicos ou serviços ambientais, há diversas definições para este termo, mas entende-se por serviços ecossistêmicos as contribuições diretas e indiretas do ecossistema para o bem-estar humano, ou seja, os bens e serviços que obtemos do ecossistema, como por exemplo produção de oxigênio atmosférico, ciclagem de nutrientes, formação e retenção de solos e ciclagem da água (FERREIRA, 2020).

Para produção de biocombustíveis, especificamente, as macroalgas têm como um dos seus constituintes predominantes, os polissacarídeos, variando entre 40% e 85% Hong *et al.* (2014) e Wei *et al.* (2013), que podem ser hidrolisados em açúcares fermentáveis e destinados à produção de etanol de terceira geração (SUDHAKAR *et al.*, 2018, GHADIRYANFAR *et al.*, 2016, HARGREAVES *et al.*, 2013, TAN; LEE, 2014, CHEN *et al.*, 2015, JIANG *et al.*, 2016, CASTRO *et al.*, 2017, ADENIYI *et al.*, 2018). A partir da década de 2000 foram demonstradas as possibilidades de serem utilizadas na produção biocombustíveis (SUDHAKAR *et al.*, 2018, GHADIRYANFAR *et al.*, 2016, FERNAND *et al.*, 2017). Elas produzem uma grande quantidade de biomassa devido à alta eficiência na captação de energia luminosa e CO₂, possuindo um baixo custo de produção Kumar *et al.* (2016) e esta biomassa pode ser utilizada para a produção de biomateriais e bio-produtos (LAGO *et al.*, 2019).

No que concerne ao emprego dessas macroalgas para a produção de biocombustível os estudos disponíveis são incipientes (FERNAND *et al.*, 2017). No entanto, corroboram que as macroalgas apresentam um grande potencial de produção para esta finalidade (GHADIRYANFAR *et al.*, 2016; FERNAND *et al.*, 2017; HARGREAVES *et al.*, 2013; TAN; LEE, 2014; CHEN *et al.*, 2015; ADENIYI *et al.*, 2018; KHAMBHATY *et al.*, 2012; SHUKLA *et al.*, 2016; KUMAR *et al.*, 2013; KUMAR *et al.*, 2016). Estes estudos apontam também que esta atividade tem potencialidade para se tornar uma alternativa tecnológica que pode assumir papel relevante no mercado mundial de biocombustíveis líquidos. Esta alternativa adere-se a infraestrutura de distribuição utilizada no mercado convencional de combustíveis líquidos e tecnologias de uso final, podendo a mesma ser introduzida e mantida em uso, com pequenos ajustes, sem, portanto, adicionar custos significativos ao processo de distribuição.

Nesse ambiente, o cultivo de macroalgas para produção de biocombustíveis ganha cada vez mais importância, já que a procura por “fontes ambientalmente amigáveis” a serem utilizadas para assegurar a crescente demanda por combustíveis líquidos, tende a aumentar, pois segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), a população atual ultrapassa o número de 7,6 bilhões de pessoas no planeta, com estimativa de chegada aos 9 bilhões até 2050, fator que acarretará de forma crescente uma maior demanda por alimentos, transportes, combustíveis líquidos e fornecimento de energia elétrica (ONU, 2017).

Visando atender esta demanda de energia no futuro de forma sustentável, a bioenergia surge como uma alternativa capaz de atender ao desenvolvimento sustentável (IEA BIOENERGY, 2017). As projeções da Agência Internacional de Energia (IEA)

fornece uma visão intensa da importância da expansão da bioenergia para atender a toda essa demanda de energia. De acordo com a IEA, a bioenergia fornecerá cerca de 17% da demanda de energia final até 2060. Ao mesmo tempo, a bioenergia pode chegar a 20% da economia cumulativa de emissões de gases de efeito estufa – GEE – (LAGO *et al.*, 2019).

De acordo com Scarlat; Dallemand (2019) no setor de energia, a bioenergia pode fornecer flexibilidade para equilibrar a expansão de recursos eólicos e solares intermitentes e sazonais. Para a indústria, a biomassa pode fornecer com eficiência o calor do processo em alta temperatura, em conjunto com uma ampla variedade de produtos químicos e materiais valiosos de base biológica. No setor de construção, a biomassa fornece a matéria-prima para sistemas de aquecimento urbano altamente eficientes, fornos e fogões. No transporte, os biocombustíveis líquidos e gasosos podem, junto com a eletrificação e a eficiência energética dos veículos, ajudar a alcançar uma redução rápida e profunda no uso de combustíveis fósseis. Além disso, os biocombustíveis são alternativas práticas atuais aos combustíveis fósseis para aviação, navegação marítima e transporte de carga pesada.

Desta forma, a participação dos combustíveis produzidos a partir de fontes renováveis tendem a ampliar a participação na matriz energética mundial (FERNAND *et al.*, 2017; OECD/IEA, 2017; LAGO *et al.*, 2019; ABUD; SILVA, 2019). Nestes termos, as macroalgas representam atrativos competitivos à produção de biocombustíveis quando comparadas à outras fontes de biomassas (KRAAN, 2013). Estas vantagens fazem das macroalgas, uma fonte promissora de matéria-prima para a produção de biocombustíveis de terceira geração, consideradas como potenciais matérias-primas para a produção de bioetanol em grande escala (FERNAND *et al.*, 2017).

Diante deste contexto de inúmeros aproveitamentos da biomassa algal que podem ser exploradas para a produção de produtos químicos de alto valor econômico (SCARLAT; DALLEMAND, 2019), a partir do processamento em larga escala dessa biomassa, nas unidades de processamento denominadas de biorrefinarias, que por definição seria o processamento sustentável da biomassa em uma gama produtos e energia comercial (DE JONG, E., VAN REE, R., KWANT, 2009).

CAPÍTULO II – ALGAS NO BRASIL

2.1 Algas no Brasil

O primeiro registro sobre o estudo das algas no Brasil apresenta uma lista de espécies coletadas na costa brasileira entre 1817 – 1818, com base em material escasso, usualmente mal coletado e preservado, que foi publicada em 1823 por Giuseppe Raddi (OLIVEIRA *et al.*, 2001; COSTA, 2009), botânico italiano nascido em Florença, membro da comissão científica organizada pelo chanceler do Império Austríaco, para fazer um amplo levantamento dos variados recursos naturais existentes no território brasileiro (OLIVEIRA, 1977).

Posteriormente, em meados do século XX, o estudo da ficologia iniciou-se no Brasil, na Universidade de São Paulo, com o pesquisador Aylton Brandão Joly que formou os primeiros ficólogos brasileiros e estes multiplicaram os estudos desse objeto no país, ampliando o conhecimento da nossa flora ficológica através do detalhamento dos estudos sobre táxons, sua ocorrência indo além da publicação de listas de espécies (OLIVEIRA *et al.*, 2001).

De acordo com Oliveira (1977), a história da ficologia marinha no Brasil pode ser dividida em três fases. A primeira iniciada em 1830, quando aparecem as referências iniciais de algas na costa brasileira, estendeu-se por mais de um século, de 1830 a 1950. Estes estudos se mostravam superficiais, apenas listando as espécies, sem descrição e localização exata. As espécies eram colhidas nas grandes expedições científicas ao novo mundo e em viagens de circunavegação, sem nenhum critério, sendo boa parte do material perdido ao longo do percurso.

A segunda fase (1951-1970) difere substancialmente da primeira, uma vez que se caracteriza pelo levantamento das floras regionais brasileiras, com trabalhos apresentando coletas sistemáticas, cuidadosas e planejadas. Nesta etapa, em 1951, registra-se o trabalho publicado pelo primeiro ficologista brasileiro e responsável pelo desenvolvimento da Botânica no Brasil, Aylton Brandão Joly, intitulado: “Contribuição para o conhecimento da flora algológica do Estado do Paraná”. Este trabalho serviu de

referência, quanto à sua metodologia, para os estudos que sucederam-se (OLIVEIRA, 1977).

A terceira fase é marcada pela expansão de novos campos de estudo na ficologia e pela investigação da flora marinha da região Nordeste. Diversos estudos foram organizados e o conhecimento adquirido, motivou a expansão da pesquisa nessa área de conhecimento. Assim, por volta de 1970, começaram a surgir trabalhos em áreas específicas da ecologia, biologia e fisiologia das espécies de interesse econômico e extração de substâncias químicas, por exemplo. Os trabalhos científicos realizados nesta terceira fase, apontaram para o aproveitamento das algas no Brasil, mostrando a importância e o potencial destas algas em várias áreas, como na ecologia, biologia, fisiologia e na extração de substâncias de interesse econômico.

Consolidada a ficologia no Brasil, abriu-se uma importante área do conhecimento para estudo, desenvolvimento do cultivo de macroalgas e o aproveitamento destas para produção de diversos produtos de interesse comercial, como o ágar, a carragena e alginato.

Historicamente, a indústria de algas marinhas no Brasil esteve baseada na colheita direta em bancos naturais. Essa forma de exploração ainda persiste em algumas comunidades costeiras no Nordeste brasileiro, onde destaca-se os estados da Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará (SORIANO, 2017).

O interesse do Brasil quanto ao aproveitamento das algas marinhas, assim como em outros países ocidentais, teve seu início durante a segunda guerra mundial, quando o Japão, que detinha o monopólio internacional da produção de ágar, deixou de exportar esta substância (OLIVEIRA, 1997). Instalou-se, então, no final da década de 1940 uma pequena indústria produtora de ágar no litoral norte de São Paulo, no município de São Sebastião. Esta indústria explorava os bancos naturais de espécies abundantes na região, como a *Pterocladia capilácea*, mas a exaustão desses bancos naturais levou a empresa a encerrar suas atividades. Ao final da década de 1960, outra companhia, a CIALGAS, se instalou no país, em Taboão da Serra/SP, para produzir ágar e carragena. Esta indústria processava algas coletadas na costa Nordeste do país, especialmente Ceará e Rio Grande do Norte. A empresa encerrou suas atividades em São Paulo, com planos de reabri-la no Rio Grande do Norte, mas isso não se efetivou (OLIVEIRA, 1997a).

Muitos motivos podem ser elencados para o fechamento das indústrias de processamento de algas no Brasil, dentre estes pode-se citar: a superexploração dos bancos naturais, os preços baixos, a competição do mercado internacional e a falta de uma

política socioeconômica para a atividade contribuíram para a redução da atividade (SORIANO, 2017).

Encontra-se em atividade, na capital João Pessoa - PB, as empresas Agar gel e Agar brasileiro, ambas fazendo o aproveitamento das algas para produção de ficocolóides agar e carragena. E produzindo carragena, a partir da macroalga vermelha *Kappaphycus alvarezii*, no estado de Rio de Janeiro, encontra-se a Algasbras⁵ (ALGASBRAS, 2021).

Analisando-se o período compreendido desde o início desse século, sobre o cultivo de macroalgas vermelhas no Brasil, observa-se que os projetos governamentais incentivaram o cultivo de algas no Nordeste brasileiro. Nestes termos, registra-se em 2001 o Projeto de Cooperação Técnica (TCP/BRA/0065) firmado entre a FAO e o governo brasileiro, com o objetivo de implantar um cultivo sustentável de algas marinhas e, em 2006, o projeto Desenvolvimento para as Comunidades Costeiras – DCC (UTF/BRA/066/BRA) com o objetivo de consolidar e expandir o cultivo de algas. Esses projetos apresentaram resultados promissores e possibilitaram a consolidação do cultivo do gênero *Gracilaria* no Nordeste, onde também incentivaram a presença de mulheres no processo de cultivo, colheita e beneficiamento das algas (FREDDI; AGUILAR-MANJARREZ, 2003); REBOURS *et al.*, 2014).

Os projetos acima mencionados visavam consolidar o cultivo do gênero *Gracilaria* no Nordeste do Brasil, o que se verificou em parte, uma vez que este gênero continua sendo fortemente cultivado em pequena escala e de forma artesanal na região (Hayashi *et al.*, 2014). Nesse formato produtivo, retira-se as mudas para o plantio e realiza-se a colheita de algas diretamente dos bancos naturais, as quais são destinadas à indústria de ficocolóides. Estas ações exploratórias sobre os bancos naturais impactou negativamente as populações de algas levando a seu esgotamento (HAYASHI *et al.*, 2014; SORIANO, 2017).

Neste cenário, registra-se a tentativa de consolidar o cultivo de algas no Brasil de forma tal que fosse preservado os bancos naturais. Em 2002, Ursi *et al.* (2013) fizeram estudos preliminares do cultivo de *Gracilaria birdiae* na região sudeste e observaram que esta espécie tinha potencial para cultivo comercial, com crescimento,

⁵ A Algasbras é uma Biorrefinaria brasileira, fundada em 2012, cultiva *Kappaphycus alvarezii* na restinga da Marambaia, litoral sul do Rio de Janeiro. Atua no setor alimentício produzindo carragena, com ciclo produtivo completo, ou seja do cultivo à embalagem do produto final, para diversas indústrias alimentícias, cosméticas, entre outras no Brasil, assim como produtos derivados de algas, como os biofertilizantes (ALGASBRAS, 2021).

rendimento e qualidade do ágar semelhantes aos obtidos na região Nordeste (URSI *et al.*, 2013).

Assinala-se também, a partir do anos de 2002, experimentos de aquicultura integrada contemplando os cultivos de algas e camarões com o objetivo de reduzir o declínio da produção de algas na região Nordeste (BEZERRA; MARINHO-SORIANO, 2010; MARINHO-SORIANO *et al.*, 2002, 2006, 2009 E OLIVEIRA *et al.*, 2007, 2012). Nesse enquadramento, considerando-se que essa região é a maior produtora de camarão marinho do Brasil e o estado do Rio Grande do Norte um dos maiores produtores nacionais. O cultivo multitrófico integrado entre espécies diferentes, que acontece na aquicultura integrada, promove a biorremediação de nutrientes e a diversificação da aquicultura por meio da produção de outras culturas marinhas de valor agregado, aumentando a lucratividade por unidade de cultivo (CHOPIN *et al.*, 2001), conformando-se assim em uma promissora alternativa para o cultivo de *Gracilaria* no Brasil (BEZERRA; SORIANO, 2010).

2.1.1 O cultivo de algas no Brasil

O cultivo de algas como atividade econômica é uma atividade recente no país, experimentos com este cultivo datam do início dos anos 2000, sendo que a maioria das iniciativas comerciais se deram e seguem ocorrendo em pequena escala e foram fomentadas por órgãos governamentais em parceria com organismos internacionais, como a FAO (SORIANO, 2017; PEREIRA; ROCHA, 2015).

No Brasil, as macroalgas são cultivadas por técnicas simples (Araújo; Rodrigues, 2011), em pequena escala, nas comunidades costeiras, através de associações de maricultoras e mais acentuadamente no Nordeste brasileiro (REBOURS *et al.* 2014 e SORIANO, 2017). Essa atividade tem potencial para contribuir para o desenvolvimento, social, econômico e ambiental de forma sustentável na região (REBOURS *et al.*, 2014). Com potencial para promover, nesse ambiente, a geração de emprego e renda através da produção do ágar, carragena, cosméticos, biofertilizantes, bioetanol, biogás, entre outros (BEZERRA, 2008; REBOURS *et al.*, 2014, ANDRADE *et al.*, 2020).

A espécie nativa escolhida para iniciar o cultivo comercial no Nordeste, foi a *Gracilaria birdiae* (FREDDI; AGUILAR-MANJARREZ, 2003), por apresentar excelentes taxas de crescimento na ordem de 7,45% ao dia, em diferentes comunidades costeiras (BEZERRA; MARINHO-SORIANO, 2010). O cultivo desta espécie pode ser realizado

com as algas presas no fundo do mar, presa a redes ou linhas na superfície ou em estruturas flutuantes (OHNO, 1998). Espécimes para cultivo podem ser obtidos através da coleta de mudas Buschmann *et al.* (2001), Rebours *et al.* (2014) ou através da germinação de esporos (GLENN *et al.*, 1998). O cultivo é realizado em pontos de atividade da maré baixa, como baías, piscinas naturais, lagoas, estuários (BEZERRA; SORIANO, 2010).

Para implementar o cultivo em escala comercial são necessários vários estudos para estabelecer um método de cultivo de fácil manejo e com uma relação custo-benefício satisfatória, bem como conhecimentos da ecologia, fisiologia e produtividade das espécies de interesse econômico. Esse conjunto de informações possibilita a implantação de cultivos produtivos, gerando fontes alternativas de renda para as populações costeiras tropicais, que geralmente dependem exclusivamente da pesca artesanal como meio de subsistência (BEZERRA; MARINHO-SORIANO, 2010).

Nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, observa-se iniciativas de cultivos comerciais envolvendo a *Kappaphycus alvarezii* Pellizzari; Reis (2011), uma espécie de macroalga vermelha produtora de carragena, vêm sendo implementada (EPAGRI, 2020). Presente em vários países tropicais, essa alga exótica foi introduzida intencionalmente no país em 1995 para reduzir as importações de carragena. Experimentos realizados no estado de São Paulo na região de Ubatuba mostraram que a espécie apresenta alto índice de crescimento e os estudos de acompanhamento demonstraram que a espécie não apresenta risco para a flora e fauna local, visto que nenhum aspecto invasor foi observado no entorno da fazenda (PAULA *et al.*, 2002). Em 1998, a espécie *Kappaphycus alvarezii* foi introduzida na Ilha Grande e em 2004, na baía de Sepetiba, ambas no estado do Rio de Janeiro. Com esse cultivo as empresas privadas estabelecidas na região passaram a fazer uso comercial da espécie para a produção de carragena (REIS *et al.*, 2007). A exemplo da empresa Algasbras, fundada em 2012 no litoral sul do Rio de Janeiro, que produz carragena e biofertilizante, a partir da espécie *Kappaphycus alvarezii*, para diversas indústrias brasileiras como a indústria alimentícia, cosméticos, oral care, emulsões industriais e outras (ALGASBRAS, 2021).

Um importante estudo sobre o Desenvolvimento ordenado e potencial da produção da macroalga *Kappaphycus alvarezii* no estado de São Paulo para extração de biofertilizante, foi realizado por Gelli (2019), onde seus resultados indicaram que as algas poderiam ser implementadas de forma ordenada no litoral norte de São Paulo, com um potencial estimado de captura de CO₂ de mais de 15 mil toneladas por ano, gerando quase 8 mil empregos e uma receita anual de aproximadamente US\$ 16 milhões de

dólares (BRASIL, 2021). No sul do estado de Santa Catarina, os resultados obtidos em estudos experimentais mostraram que *Kappaphycus alvarezii* apresenta boas perspectivas de cultivo e considerável potencial para integração com a produção de crustáceos (EPAGRI, 2020 e HAYASHI *et al.*, 2011).

Quanto ao aproveitamento das algas produzidas, este acontece mais intensamente no continente asiático, onde as algas são usadas há milênios pelos povos asiáticos, que são os maiores consumidores e produtores de algas no mundo (FAO, 2020).

Mais de 80% da produção mundial de algas é consumida diretamente pelo homem em sua alimentação, na forma de alimentos como “wakame” da alga *Undaria pinnatifida*, muito consumida em saladas pelos japoneses e o “kombu” da alga *Saccharina japonica*, muito utilizada na preparação de caldos que é a base da culinária asiática; e ingerida também na forma de aditivo alimentar, como a carragena, manitol, alginato e iodo obtido da espécie *Saccharina japonica* (WHITE; WILSON, 2015). O restante da biomassa tem seu aproveitamento na fabricação de fertilizantes, aditivos para rações animais e, cada vez mais, para aplicações médicas e biotecnológicas (McHUGH, 2003). Outro aproveitamento para as algas marinhas, com potencial reconhecido mas ainda pouco explorado, é na biotecnologia e na produção sustentável de biocombustíveis (MAZARRASA *et al.*, 2014).

O aproveitamento das algas na América Latina, responsável por 17% da biomassa produzida comercialmente no mundo, é destinado à produção de ágar e carragena, apesar de existir o potencial, no continente, para o desenvolvimento de uma indústria baseada em produtos funcionais humanos (HAYASHI *et al.*, 2014).

Na América latina, apenas o Chile – maior produtor de algas do continente – faz uso alimentar direto das algas (SIMIONI *et al.*, 2019). Nos demais países da América latina, o consumo de algas acontece predominantemente pelo uso dos ficocolóides inseridos na fabricação de produtos alimentícios. O Brasil, por exemplo, fez uso em 2020, de 106 toneladas de ágar e 3.116 toneladas de carragena, comercializadas a US\$ 16,929 e US\$ 7,867 respectivamente (BRASIL, 2021).

O Brasil importou em 2020 quase 30 vezes mais a quantidade de carragena que a quantidade de ágar, porém a tonelada de ágar foi importada por mais que o dobro do preço da tonelada de carragena BRASIL (2021), conforme demonstra os dados de importação na Tabela 3.

A Tabela 3 traz as quantidades de ficocolóides importados pelo Brasil em 2020.

Tabela 3 - Quantidade ficocolóides importados pelo Brasil em 2020

Produto	Quantidade (t)	Valor (US\$)	Valor/ton (US\$)
Ágar-ágar	106	1,800,407	16,984.97
Carragena	3.116	24,514,063	7,867.15

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados de importação do MDIC. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral>

O Brasil reúne inúmeros fatores que o tornam um potencial produtor de biomassa algal por meio do cultivo comercial de algas. Entre estes fatores estão o clima, a topografia, as condições ambientais de temperatura, salinidade e luminosidade favoráveis, durante a maior parte do ano, espécies nativas com bom potencial produtivo, grande mercado consumidor e a possibilidade da atividade tornar-se fonte de emprego e renda. No entanto, deve ser dada atenção especial quanto às peculiaridades regionais, atividades reguladoras, qualificação de mão de obra, associações de produtores, estratégias de vendas e marketing (SORIANO, 2017).

A produção brasileira de macroalgas em 2014 foi 0,7 mil toneladas, ou seja, 700 toneladas de macroalgas. Neste ano, vinte e cinco países produziram mais de 200.000 toneladas de produção aquícola total⁶. Em conjunto, eles produziram 96,3% dos peixes cultivados e 99,3% das macroalgas cultivadas no mundo (FAO, 2016).

Nas edições seguintes dos relatórios da FAO, o Brasil deixou de repassar seu dados produtivos oficiais relacionados à pesca de captura e aquicultura à FAO, apenas os dados sobre atuns e espécies semelhantes foram descritos, pois foram obtidas por meio de Organizações Regionais de Gestão de Pescas (ORGP) (FAO, 2020). Esta lacuna de dados dificulta o aprofundamento das pesquisas e desenvolvimento de políticas públicas voltadas para o setor.

A ausência de dados produtivos, desde os anos 2000 até 2011 sobre cultivo e colheita de macroalgas no Brasil é citado por Rebours *et al.* (2014) quando estuda o cultivo de macroalgas como uma oportunidade de emprego e renda, de maneira sustentável para as comunidades costeiras. A inexistência de dados também é citada por Reis *et al.* (2017) quando afirma que a atividade de Algacultura é a cultura da aquicultura de menor produção no Brasil, não havendo dados oficiais disponíveis sobre sua

⁶ A produção aquícola total refere-se ao somatório das produções aquícolas, inclui-se o total de peixes produzidos e a quantidade de plantas aquáticas ou macroalgas produzidas, conforme quadro 9, pág. 29, do El estado mundial de la pesca y la acuicultura, FAO (2016).

produção no Sistema de Informação Global de Pesca da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, FAO.

2.1.2 Cultivo de macroalgas no Rio grande do Norte

O Estado do Rio Grande do Norte (RN), objeto de investigação nesta tese, tem a exploração comercial de macroalgas marinhas iniciada na década de 1960 (SORIANO, 2017). Onde desenvolveu-se uma rede comercial com vista à exploração das macroalgas agarófitas e carragenófitas, as quais desempenharam um papel importante na economia das comunidades costeiras (DURAIRATNAM, 1989; BEZERRA, 2008; REBOURS *et al.*, 2014). Parte representativa destas comunidades, impulsionada pelo atrativo econômico registrado à época, encontrava na colheita das macroalgas de interesse industrial, um complemento de renda acrescida a outras atividades praticadas na costa Potiguar, como por exemplo, a pesca (BEZERRA, 2008; SORIANO, 2017).

A colheita de algas aconteceu de forma extrativista por décadas, quando nos anos 2000 a superexploração dos bancos naturais de algas ocasionou o declínio e desaparecimento de várias populações de agarófitas no litoral potiguar (SORIANO, 2017). Para tentar conter os impactos da superexploração nos bancos naturais, alguns projetos foram implantados, a exemplo do TCP/BRA/0065 e UTF/BRA/066/BRA já referenciados.

O cultivo de algas no Rio Grande do Norte caracteriza-se pelo uso de técnicas simples, de baixo custo de fabricação e realizado por mulheres organizadas em associações de produtoras que dedicam-se à conservação dos bancos de algas realizando a exploração e o uso destas, através da extração periódica para o suprimento de sementes utilizadas no próprio cultivo, pois preocupam-se também com a sustentabilidade da atividade que proporciona a elas independência financeira, com emprego e renda derivado dessa atividade, tornando-as protagonistas na economia familiar e com trabalho reconhecido pela comunidade local (SANTOS, 2015; ONU, 2018; SORIANO, 2017; REBOURS *et al.* 2014).

O cultivo acontece no município de Rio do Fogo – RN, distante 70 km da capital Natal, e, a área gerida pela Associação de Maricultoras de Rio do Fogo (AMAR), que cultiva a espécie *Gracilaria birdiae* em 1ha, a 190 m da costa. O cultivo é feito em estruturas do tipo balsas (OHNO, 1998), onde as macroalgas crescem em redes tubulares (ANDRADE *et al.*, 2020).

O cultivo de algas também é registrado no município de Extremoz – RN, litoral oriental do estado do Rio Grande do Norte, na praia de Pitangui, distante 25 km da capital do estado, sob a gestão da Associação de Maricultura e Beneficiamento de Algas de Pitangui (AMBAP), onde também se cultiva a espécie *Gracilaria birdiae*, em um sistema de balsa, ocupando 1ha, a uma distância de 100 m da linha da praia, com profundidade batimétrica aproximada de 3 m (ANDRADE *et al.*, 2020).

A Figura 7 destaca os municípios onde há cultivo artesanal de algas no Rio Grande do Norte.

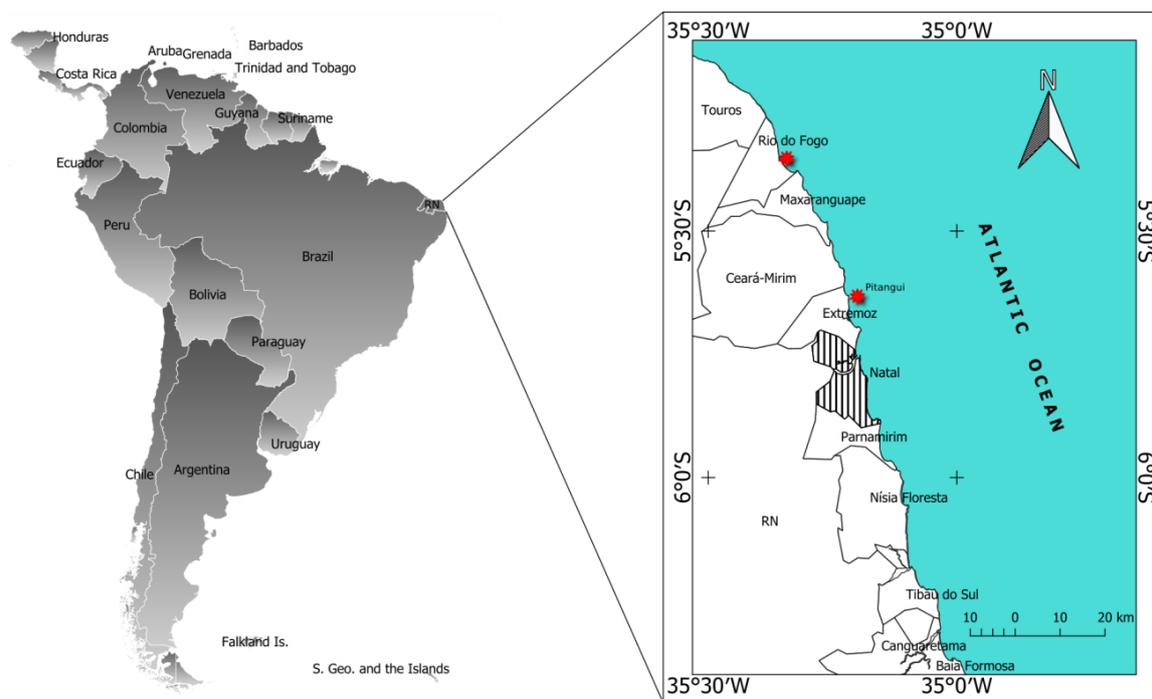


Figura 7 - Locais de cultivo de algas marinhas, marcados em vermelho e a capital do estado destacado em polígono listrado
 Fonte: Elaboração própria

2.1.3 Caracterização dos municípios produtores de algas no Rio Grande do Norte

Os dois municípios onde registra-se a produção de algas no estado, são municípios tradicionalmente envolvidos com a pesca artesanal e o cultivo de macroalgas persiste como uma atividade secundária, em pequena escala, de forma artesanal e através de duas associações de maricultoras (Andrade *et al.*, 2020). Estes municípios apresentam baixo IDHM e grande vulnerabilidade econômica social, conforme será detalhado

mais adiante na Tabela 4, por este motivo foram selecionados no início dos anos 2000 para implantação de projetos piloto no cultivo de macroalgas visando o desenvolvimento regional (REBOURS *et al.*, 2014).

O município de Rio do fogo foi escolhido, em 2001, para implantar um projeto de cooperação técnica (TCP/BRA/0065) entre a FAO e o governo brasileiro, objetivando, em um projeto piloto, o cultivo de algas marinhas em pequena escala no litoral do RN. Em 2006 no mesmo município, foi implantado um segundo projeto intitulado: Desenvolvimento de Comunidades Costeiras – DCC (UTF/BRA/066/BRA) (SORIANO, 2017). Após a implantação deste projeto vários estudos aconteceram na área confirmando a viabilidade técnica, produtiva e socioeconômica do cultivo de algas da espécie *Gracilaria birdae* nesta região. Como pode-se destacar em Bezerra; Soriano (2010) que realizaram estudos sobre cultivo desta alga, avaliando suas taxas de crescimento para implantação de um cultivo de escala comercial. Santos Júnior *et al.* (2017) avaliaram a viabilidade econômica dos produtos à base de algas cultivadas pelas maricultoras da região. Silva *et al.* (2012) analisaram a influência do turismo sobre a diversidade de algas existentes na região. Bezerra (2008) avaliou o cultivo de algas marinhas como alternativa para o desenvolvimento de comunidades costeiras. Rebours *et al.* (2014) estudou o cultivo de algas como uma oportunidade de renda e subsistência de forma sustentável para estas comunidades. Torres (2017) por sua vez realizou a caracterização química das espécies nativas da localidade. UFV (2013) estudaram os efeitos da alimentação e nutrição a base de algas. Santos (2015) e Silva (2010) realizaram estudos sobre a caracterização e diversidade da flora marinha da região.

O município de Rio do Fogo possui uma área de 151,097 km², com uma população estimada para 2020 de 10.905 habitantes, IDHM de 0,569, uma densidade demográfica de 66,94 hab/km², apresentando menos de 1% dos domicílios com esgotamento sanitário adequado.

Sua economia apresenta um PIB per capita de 15.667,37 reais e 93,2 % das receitas são oriundas de fontes externas advindas de transferências do governo federal e estadual, programas sociais dentre outros. Grande parte de sua população vive exclusivamente da pesca da lagosta, assim como de peixes, moluscos e da coleta das algas de valor econômico, principalmente o gênero *Gracilaria* e *Hypnea* (SANTOS, 2015). Quanto ao trabalho e rendimento, em 2018, o salário médio mensal era de 1,9 salários-mínimos, a proporção de pessoas ocupadas em relação à população total era de 7,2%. Considerando domicílios com rendimentos mensais de até meio salário-mínimo por pessoa, registrava-se 51,8% da população nessas condições, o que colocava o município

na posição 46 de 167 dentre as cidades do estado do Rio Grande do Norte e na posição 1042 de 5570 dentre as cidades do Brasil (IBGE, 2020). A agricultura do município é baseada em culturas de subsistência como feijão, mandioca, melancia, milho e tomate. Na pecuária, há uma pequena produção leiteira oriunda de um rebanho de 1400 cabeças e na aquicultura registra-se o cultivo de Tilápia com produção de 12 t em 2019.

O cultivo de algas no município de Extremoz é realizado pela Associação de Maricultura e Beneficiamento de Algas de Pitangui – AMBAP também liderada por mulheres. Este município fica distante 25 km da capital do estado, apresenta uma área de 140,639 km² e uma população estimada para 2020 de 28.936 habitantes, IDHM de 0,660, uma densidade demográfica de 176,03 hab/km² e 37,7% de domicílios com esgotamento sanitário adequado, economicamente apresenta um PIB per capita de R\$13.667,37 reais. Na pecuária, destaca-se na aquicultura para produção de camarão e tilápia, com produções de 30 e 35 toneladas, respectivamente em 2019. Quanto a renda, em 2018, o salário médio mensal era de 2,1 salários-mínimos, a proporção de pessoas ocupadas em relação à população total era de 10%. Considerando os domicílios com rendimentos mensais de até meio salário-mínimo por pessoa, o município registrou 43,2% da população nessas condições, o que o colocava na posição 150 de 167 dentre as cidades do estado e na posição 2344 de 5570 dentre as cidades do Brasil (IBGE, 2020b).

A Tabela 4 apresenta os dados socioeconômicos dos municípios onde se registram cultivo de algas no Rio Grande do Norte.

Tabela 4 - Caracterização dos municípios produtores de algas no Rio Grande do Norte

Critérios	Municípios	
	Rio do Fogo – RN	Extremoz – RN
Distância da capital	70 km	25 km
População estimada para 2020:	10.905 habitantes	28.936 habitantes
Densidade demográfica	66,94 hab/km ²	176,03 hab/km ²
Trabalho e Rendimento:		
Salário médio mensal dos trabalhadores for- mais [2018]	1,9 salários	2,1 salários-mínimos
População ocupada [2018]	7,2%	10%
Economia:		
PIB	R\$15.667,37	R\$13.667,37
IDHM	0,569	0,660
Percentual das receitas oriundas de fontes exter- nas [2015]	93,2 %	59,3 %
Território e ambiente:		
Área da unidade territorial [2020]	151,097 km ²	140, 639 km ²
Esgotamento sanitário adequado [2010]	0,8%	37,7%
Produção agrícola:	Culturas de subsistência	Culturas de subsistência
Pecuária:	Rebanho bovino de 679 cabeças	Rebanho bovino de 1229 cabeças
Aquicultura	Cultivo de Tilápia com produção de 12 t em 2019	Cultivo de camarão com produção de 30 t e cultivo de tilápia com produção de 35 t em 2019.

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do IBGE, 2021.

2.2 O cultivo de macroalgas como alternativa para desenvolvimento econômico social das comunidades costeiras

As algas marinhas possuem um elevado e reconhecido potencial em várias áreas, desde a indústria alimentícia até a biotecnologia e segue firmando-se como promissora fonte de biocombustíveis, porém todo esse potencial tem sido pouco explorado mesmo considerando-se todas as vantagens já mencionadas (MAZARRASA *et al.*, 2014).

Como uma das formas de promover a expansão deste cultivo de forma mais célere e abrangente, tem-se os cultivos integrados na aquicultura entre as espécies como peixes e camarões, melhorando a sustentabilidade nos sistemas produtivos e por consequência aumentando a produção de alimentos. Estimulado por essas demandas e pelo esforço para reduzir a superexploração dos recursos naturais, o cultivo de algas marinhas tem se expandido rapidamente em vários continentes, desde o sudeste da Ásia até a América do Sul e África Oriental (LOUREIRO *et al.*, 2015). O cultivo de macroalgas tem sido desenvolvido no mundo motivado por diversos fatores, como: o aumento da demanda; a limitação dos bancos naturais; por ser uma atividade alternativa sustentável para comunidades pesqueiras; ser um estímulo ao desenvolvimento industrial de países tropicais, gerar ocupação e renda para comunidades costeiras carentes (REBOURS *et al.*, 2014; Soriano, 2017).

Essa atividade é reconhecida pelos organismos internacionais, como a FAO, pela capacidade de desenvolver regiões costeiras pobres pelo mundo (GELLI, 2019). Vários trabalhos confirmaram essa possibilidade de melhoria da qualidade de vida através do emprego e renda proporcionado pelo cultivo de macroalgas (BEZERRA, 2008; REBOURS *et al.*, 2014; PEREIRA; ROCHA, 2015, SANTOS, 2015 e ANDRADE *et al.*, 2020).

Nesse contexto, é fundamental entender que a sustentabilidade de uma atividade ao longo do tempo, exige não só viabilidade econômica, mas também viabilidade social, cultural, política e ambiental. A sustentabilidade em aquicultura se fundamenta em três pilares: eficiência econômica, prudência ecológica e equidade social. Assim, qualquer tentativa de estabelecer essa atividade deve levar esses fundamentos em consideração (PEREIRA; ROCHA, 2015).

O cultivo de algas tem um papel importante no desenvolvimento da maricultura (cultivo de organismos marinhos) sustentável e representa um meio de vida alternativo para os pescadores (BIXLER; PORSE, 2011). Os resultados obtidos em estudos experimentais com o cultivo da espécie de macroalga vermelha *Kappaphycus. Alvarezii*, apresentou boas perspectivas e considerável potencial para integração com cultivo de crustáceos no sul do estado de Santa Catarina (HAYASHI *et al.* 2011), permitindo que os maricultores diversifiquem suas produções com o cultivo integrado de ostras, mexilhões e algas, ao mesmo tempo em que protegem e qualificam as fazendas marinhas, elevando o lucro desses produtores (EPAGRI, 2020).

De acordo com Gelli (2019), o cultivo de macroalgas tem potencial ambiental, econômico e social para desenvolver comunidades costeiras no litoral de São Paulo. Segundo a autora, o potencial produtivo das macroalgas no estado de São Paulo foi estimado considerando-se a produção de 110 toneladas/ha/ano de algas frescas e a produção do extrato artesanal ou biofertilizante de macroalgas mostrou-se viável economicamente com preço de venda a partir de R\$ 9,00/litro.

Observa-se um potencial produtivo e econômico, oriundo do cultivo de macroalgas como alternativa para desenvolvimento econômico e social no litoral oriental do estado do Rio Grande do Norte. As áreas identificadas por Andrade *et al.* (2020) como adequadas para o cultivo o que corresponde a 1.825,47 ha, tem a capacidade produtiva de 16 mil t de biomassa seca por ano e 35.180 toneladas de Ágar. Considerando-se o preço de venda da biomassa seca adotado pela Associação AMAR que alcança US\$ 50,00/kg obtêm-se uma expectativa de mercado em movimentar US\$ 800.000,00 por ano com a biomassa seca (ANDRADE *et al.*, 2020).

Como a atenção que foi dada a atividade da AMAR no processo de empoderamento feminino, em 2013 a associação recebeu um grupo de nutricionistas do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Nutrição da Universidade Federal de Viçosa – UFV, que, em atividade conjunta com as associadas, desenvolveu produtos alimentícios à base de algas marinhas visando o desenvolvimento social de comunidades costeiras (UFV, 2013).

A pesquisa realizada na associação conquistou, em 2013, o primeiro lugar na área de Nutrição em Saúde Pública e o segundo lugar na área de Ciência e Tecnologia de Alimentos, do Prêmio Henri Nestlé, que tem por objetivo estimular a produção de pesquisas científicas e o intercâmbio de ideias, por ter desenvolvido um biscoito enriquecido com algas. As pesquisadoras da UFV ofereceram oficinas de forma a

compartilhar a tecnologia e socializar os aprendizados que culminou com a elaboração de uma publicação voltada às mulheres maricultoras contendo as receitas desenvolvidas na pesquisa. Essa publicação contempla uma variedade de alimentos tais como: sorvetes, saladas; gelatinas, massas (UFV, 2013b).

As maricultoras que já cultivavam, colhiam e processavam as algas, a partir deste treinamento, passaram a preparar os alimentos e comercializá-los no município. Este fato permitiu a diversificação dos produtos pela associação e contribuiu para a geração de emprego e renda das mulheres da AMAR (UFV, 2013a).

Em 2018, a AMAR, que foi a primeira associação a ter licença ambiental para cultivo de dez hectares marítimos, concedido pela Marinha do Brasil, recebeu um prêmio de reconhecimento das Organizações das Nações Unidas – ONU por realizar o cultivo de algas, de forma empreendedora, promovendo emprego e renda às mulheres da comunidade local, tornando-as independentes financeiramente (ONU, 2018b). Mesmo com o potencial econômico e de transformação social, o cultivo de algas apresenta ainda elevada fragilidade o que impera a urgente adoção de políticas públicas voltadas a sua consolidação como atividade geradora de emprego e renda (PEREIRA; ROCHA, 2015).

2.3 Cultivo de algas e empoderamento feminino no litoral do RN

De acordo com a FAO (2020) a aquicultura está sendo promovida como um importante setor produtivo em expansão pelo mundo e como uma atividade que pode empoderar mulheres e jovens, em particular ao facilitar a tomada de decisão das mulheres sobre o consumo e fornecimento de alimentos nutritivos. Porém, Brugere; Williams (2017) advertem que deve ser dada atenção às espécies cultivadas, às ideias pré-concebidas sobre os papéis dos gêneros e ao controle da produção para que as mulheres possam realmente se empoderar e se beneficiar dessas possíveis vantagens, pois as oportunidades das mulheres na aquicultura não acompanharam o rápido crescimento do setor.

No Brasil, a colheita de algas marinhas é considerada uma atividade secundária realizada sem a participação do chefe da família, geralmente um pescador (SORIANO, 2017). Embora não haja dados oficiais sobre o número de homens e mulheres na colheita de algas, estima-se que 80% dos colhedores sejam mulheres Brennan (2013) e

os poucos homens envolvidos são geralmente idosos aposentados (SORIANO, 2017). O predomínio de mulheres se deve ao fato dessa atividade demandar menos tempo do que a pesca, uma vez que ocorre apenas na maré baixa e próximo a suas residências, o que a torna compatível com as responsabilidades domésticas, incluindo o cuidado dos filhos (REBOURS *et al.*, 2014).

Desde a década de 1960 até os anos 80, a colheita de algas marinhas foi a principal fonte de renda para as famílias de pequenos pescadores da região Nordeste. Neste período, era comum famílias inteiras participando da colheita. Com o declínio dos estoques naturais, ocorrido ao final da década de 1990, os homens abandonaram a atividade de colheita e migraram para outras atividades mais lucrativas, como a carcinocultura em franca expansão no Nordeste brasileiro, no início dos anos 2000. Com o declínio do recurso e consequente migração dos homens para outras atividades, a colheita de algas passou a ser protagonizada pelas mulheres das comunidades pesqueiras que persistiram na atividade. Elas permaneceram devido ao conhecimento adquirido das gerações anteriores, ainda na infância, sobre o ambiente costeiro, marés, correntes e vida marinha, e deram continuidade a atividade como forma de preservar a tradição da colheita de algas e como uma atividade capaz de gerar emprego e renda para elas, levando em consideração a baixa escolaridade dessas mulheres que não possibilitou outras oportunidades de emprego. Para estas mulheres, embora a extração de algas marinhas seja realizada em tempo parcial, ainda é considerada a ocupação principal (SORIANO, 2017).

Em 2006, após a apresentação do Projeto de Desenvolvimento de Comunidades Costeiras (DCC) do Ministério da Pesca e Aquicultura, as mulheres envolvidas na colheita de algas decidiram iniciar o cultivo no município de Rio do Fogo/RN. Pelo projeto, elas aprenderam técnicas de cultivo, adotando procedimentos ecologicamente sustentáveis e assim puderam obter uma maior produção e maior rentabilidade (SANTOS, 2015). Uma vez o cultivo implantado, o grupo de mulheres criou a Associação de Maricultoras de Algas de Rio do Fogo (AMAR) com o intuito de fortalecer a atividade. E de fato houve o fortalecimento da atividade, uma vez que o cultivo trouxe mudanças positivas para vida dessas mulheres na forma de independência financeira em relação ao marido, no reconhecimento do trabalho delas por eles e pela comunidade, evidenciando a inserção, aceitação e valorização do trabalho da mulher frente ao trabalho dos homens, resgatando assim a autoestima e ocasionando o empoderamento destas mulheres (SANTOS, 2015; ONU, 2018a).

Na comunidade pesqueira de Rio do Fogo, as mulheres foram à procura de alternativas geradoras de trabalho e renda, buscando conquistar seus espaços profissionais, afirmar sua identidade, assumir a luta pela sustentabilidade da atividade e pela sobrevivência da família. Desta forma, estão contribuindo com a redução da pobreza e das desigualdades sociais, além de colher as algas nos bancos naturais, de forma mais consciente quanto a preservação deste recurso natural (SANTOS, 2015). Neste sentido, reforça-se a importância de se criar políticas públicas que considerem o papel e a importância da mulher, incorporando a perspectiva de gênero no contexto das políticas em âmbito nacional, reconhecendo a mulher como agente de desenvolvimento aliado à conservação dos recursos naturais (FIGUEIREDO, 2013).

No Rio Grande do Norte, nas comunidades onde existe o cultivo de algas, mais de 70% da mão de obra é feminina e tal atividade acontece devido a força e a garra dessas mulheres, que têm resistido para consolidar o cultivo, através da dedicação e apego à atividade (FERREIRA, 2020). Mesmo diante dos inúmeros entraves postos à atividade, como a falta de políticas públicas de apoio ao desenvolvimento da atividade, elas resistem por acreditar no potencial transformador do cultivo de algas em suas vidas e na comunidade (BEZERRA, 2008; SANTOS, 2015); FERREIRA, 2020). O trabalho realizado por estas mulheres é intenso, pois elas realizam todas as etapas produtivas do cultivo, desde a confecção das estruturas de cultivo (balsas), a colheita das mudas, o processamento das algas que envolve seleção, limpeza, lavagem, secagem e trituração, até a elaboração e comercialização dos produtos de valor agregado como alimentos e cosméticos a base das algas (FERREIRA, 2020).

Diante do exposto, percebe-se a importância que o cultivo de macroalgas têm na vida das mulheres das comunidades costeiras (PEREIRA *et al.*, 2015), considerando-o como uma atividade potencial para o desenvolvimento socioeconômico destas comunidades (REBOURS *et al.*, 2014; SORIANO, 2017; FERREIRA, 2020).

CAPÍTULO III – PERCURSO METODOLÓGICO

3.1 Caracterização do Objeto de Estudo

3.1.1 Área de Estudo

O Brasil tem uma costa que se estende por mais de 7.400 km, situando-se entre as fozes dos rios Oiapoque (04 ° 52 ' 45 " N) e Chuí (33 ° 45 ' 10 " S). O litoral brasileiro apresenta águas quentes nas costas Norte e Nordeste e águas frias nas costas Sudeste e Sul, abrigando uma grande variedade de ecossistemas, incluindo recifes, praias arenosas, costões rochosos, estuários e mangues, que contêm numerosas espécies de flora e fauna (MMA, 2007; DIETER MUEHE, 2015).

No Brasil, as macroalgas ocorrem ao longo de toda a costa, mas são mais diversificadas e abundantes na Região Nordeste. A exuberância de macroalgas nesta região está relacionada principalmente a condições favoráveis de temperatura, salinidade e luz, além de substratos rochosos e recifes, adequados para o estabelecimento e crescimento de macroalgas (CARNEIRO *et al.*, 2011).

Na costa Nordeste, a ausência de grandes rios e a predominância de águas quentes da corrente equatorial fornecem um ambiente adequado para a formação de recifes com considerável diversidade biológica. Dada a sua localização tropical, os parâmetros ambientais da região Nordeste são relativamente constantes, sem grandes alterações ao longo do ano, como é o fotoperíodo 12:12 h. A amplitude da maré varia de 0,0 a 2,9 m. Existem duas estações distintas nesta região: a estação chuvosa de março a julho e a estação seca durante o resto do ano (VITAL *et al.*, 2016).

O Estado do Rio Grande do Norte – RN localiza-se na região Nordeste do Brasil, tem uma extensão total de 53.077,3 km², ocupando 3,41% da área desta e aproximadamente 0,62% do território nacional. Localiza-se no hemisfério sul ocidental e seus pontos extremos são limitados pelos paralelos de 4°50' e 7°20' de latitude sul e pelos meridianos 34°58' e 35°36' de longitude oeste de Greenwich IDEMA (2014), conforme apresentado na Figura 9.

O litoral do estado é caracterizado por recifes de coral que são ambientes altamente diversificados, de significativa importância ecológica, econômica e social (Leão *et al.*, 2003). Em algumas áreas seus recifes se estendem em uma longa faixa paralela à costa, proporcionando uma proteção eficaz contra a ação das ondas, o que muito favorece o desenvolvimento de diferentes espécies de macroalgas (SOUSA *et al.*, 2012).

O litoral do RN possui uma costa pouco recortada com 410 km de extensão. É dividido em dois setores, oriental e Setentrional, em função da sua localização geográfica, que imprime uma direção preferencial da linha de costa na direção Norte-Sul, para o setor Oriental, e direção Este-Oeste, para o setor setentrional, associada a diferenças climáticas e tectônicas, que por sua vez influenciam no regime de direção dos ventos e padrão de circulação oceânica que, juntos, modelam o litoral do estado. Os ventos que passam pelo estado apresentam uma proveniência predominante do quadrante SE, com velocidade variando entre 3,8 e 5 m/s na estação da capital do estado – Natal –, gerando uma deriva litorânea que durante quase todo o ano transporta sedimentos no sentido de S para N (VITAL *et al.*, 2016).

O setor Oriental do litoral do estado tem 166 km de extensão, representando 41% do litoral, com predominância de praias arenosas, planas e estreitas, com clima tropical quente e úmido. Já o setor setentrional apresenta-se com 244 km de extensão, representando 59% do litoral do estado, com predominância de praias arenosas e clima tropical quente e seco ou semiárido (VITAL *et al.*, 2016).

A área investigada nesta tese compreende a porção Oriental do litoral do Estado do RN/Brasil, a qual é limitada ao sul pela praia do Sagi, município de Baía Formosa (divisa com os estados do RN com Paraíba) e ao norte pelo Cabo Calcanhar, no município de Touros/RN. Esta área está distribuída em 101 km (61%) de praias arenosas planas e estreitas; e 65 km (39%) de falésias ativas - tabuleiros costeiros da formação de barreiras que chegam até o mar. Também se apresenta como uma planície costeira entrecortada por estuários dominados por ondas, e estruturalmente com enseadas em formato de zeta (NIMER, 1989).

A Figura 9 representa a delimitação do Litoral Oriental estado do RN, que é objeto desta tese.

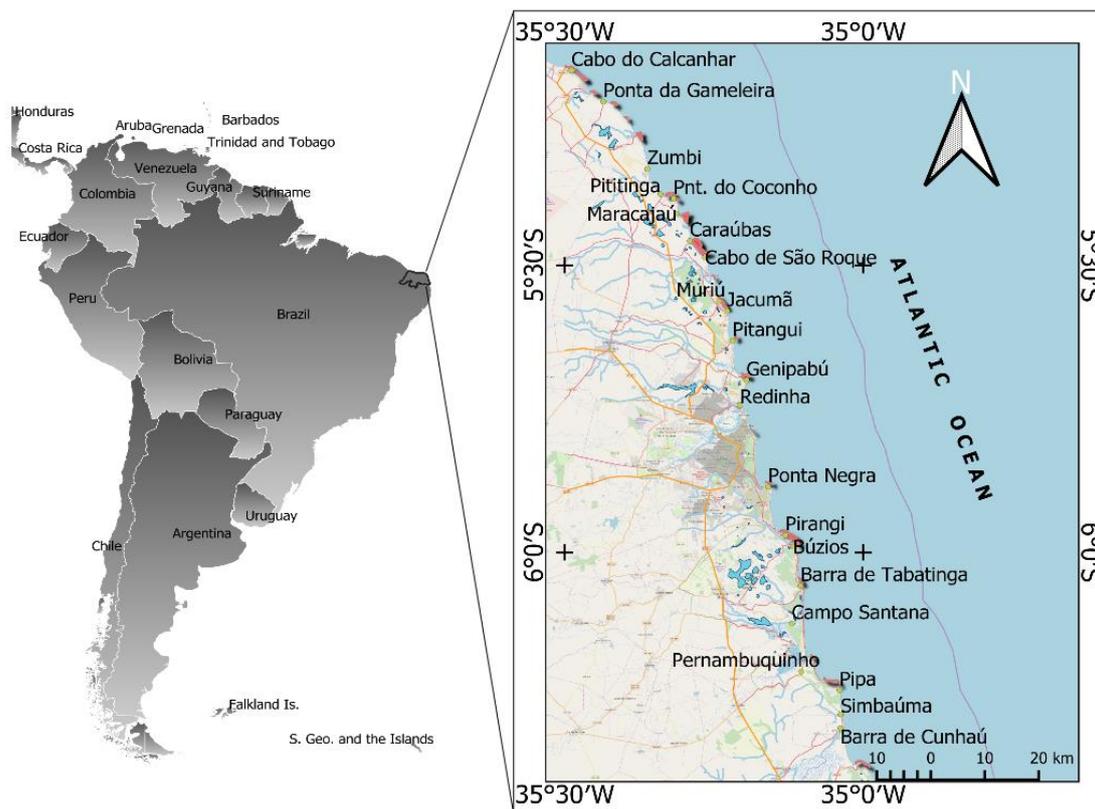


Figura 8 - Representação do Litoral Oriental do estado do RN. Destacado em manchas vermelhas, as áreas costeiras com potencial de produção de macroalgas identificadas por Sousa *et al.* (2012).
 Fonte: Elaboração própria baseado em Sousa *et al.*, 2012.

Na área de estudo existem dois cultivos comerciais de macroalgas. Eles estão situados nas comunidades de pescadores artesanais da Praia de Rio do Fogo/RN e da Praia de Pitangui no município de Extremoz/RN.

Na praia de Pitangui, distante aproximadamente 25 km da capital do estado, registra-se um cultivo da *Gracilaria birdiae* que acontece a uma distância de aproximadamente 100 m da linha da praia com profundidade batimétrica aproximada de 3 m, ocupando 1 ha, que pertence a Associação de Maricultura e Beneficiamento de Algas de Pitangui (AMBAP).

Já na praia de Rio do Fogo, município de Rio do Fogo/RN, distante 70 km de Natal, o cultivo que ocupa 1 ha encontra-se a uma distância de 190 m da costa, sendo este pertencente a Associação de Maricultoras de Rio do Fogo (AMAR).

3.2 Critérios de Seleção de Áreas de Cultivo

Nesta tese foi desenvolvida uma base de dados SIG (Sistema de Informação Geográfica) para integração de dados espaciais de várias fontes, o que permitiu a manipulação destes em meio digital. A integração de dados espaciais de caráter ecológico e econômico também permitiu a combinação de camadas possibilitando o cruzamento de informações sobre áreas de cultivo de macroalgas no litoral Oriental do estado do Rio Grande do Norte. Além disso, foi possível estimar o potencial produtivo compondo cenários e padrões de uso das áreas costeiras como um modelo viável e flexível.

Locais de aproveitamentos onde as águas são abrigadas naturalmente da ação das ondas e das correntes marinhas e suas profundidades variam entre 1,0 e 3,0 m (SOUSA *et al.*, 2012), é considerado como um fator oportuno, pois esta faixa de profundidade é adequada para o desenvolvimento do cultivo, podendo-se utilizar várias técnicas, como por exemplo, instalações de gaiolas flutuantes, estruturas fixas e jangadas. Por outro lado, a profundidade superior a 3,0 m, a baixa qualidade da água, as fortes correntes e altas ondas atuam como entraves para a seleção de áreas propícias ao cultivo. Fatores sócio-infraestruturais, como estradas de acesso (principais e secundárias), proximidade de populações tradicionais como vilas de pescadores ou vilarejos rurais são uma condição importante para o desenvolvimento do cultivo de macroalgas. Utilizou-se como critério de exclusão, as áreas que se situam próximas ao tráfego de barcos, marinas, roteiros turísticos, áreas de pesca, áreas urbanas, distância da foz do rio e do porto.

Ponderando apenas critérios físicos, por meio de seleção, dimensionamento e hierarquização de espaços adequados para o cultivo de macroalgas *Gracilaria birdiae*, o litoral Oriental do estado do Rio Grande do Norte tem mapeado uma área de 2.232,20 ha viáveis a este fim (SOUSA *et al.*, 2012).

A costa litorânea do Rio Grande do Norte tem identificada uma área total de 3.316,82 ha com alguma vocação para o cultivo de macroalgas, da qual 94,6% (3.137,64 ha) foram consideradas altamente adequadas ou adequadas, contra 4,4% das áreas avaliadas como pouco adequadas. Neste contexto, a região objeto de estudo – Litoral Oriental do RN – tem mapeada 2.232,20 ha que apresentam viabilidade para este cultivo.

A classificação dessas áreas levou em consideração apenas critérios físicos como parâmetro de seleção, tais quais as áreas costeiras abrigadas de ondas e correntes marinhas, com profundidades entre 1,0 e 3,0 m. A mesma em sua análise espacial utilizou-se do Processo de Análise Hierárquica (AHP) das variáveis de cultivo, as quais foram avaliadas por meio de uma matriz de comparação pareada em uma escala contínua partindo da menos importante ($1/9$, $1/7$, $1/5$... $1/3$) até a mais importante (1, 3, 5, ..., 9), conforme especificada na Tabela 5.

Quando do mapeamento das distribuições espaciais de cada fator, esses foram compilados como fontes de dados e o conceito Fuzzy foi processado espacialmente para ponderação dos fatores. A função difusa de associação (por exemplo, linear, em forma de j e sigmoïdal) e as classificações de adequação foram baseadas no nível de importância de um fator específico que influencia o cultivo de algas marinhas (EAST-MAN, 2012 e SOUSA *et al.*, 2012). Neste caso, cada fator padronizado é uma escala contínua de adequação do cultivo de macroalgas entre 0 (menos adequado) a 8 (mais adequado) para respectivo cultivo.

A Tabela 5 expressa a Matriz de Comparação Pareada que possibilitou avaliar a importância relativa dos parâmetros utilizados referentes ao cultivo de macroalgas no Rio Grande do Norte. Os pesos de cada variável, como critério de avaliação de cultivo, foram gerados e utilizados como fatores de ponderação para a potencialidade de cultivo de cada área selecionada.

Tabela 5 - Matriz de comparação pareada para avaliação da importância relativa dos parâmetros para o cultivo de algas marinhas no RN

Parâmetros	Distância para:								Pesos
	Leitos naturais	Para o mar	Mercado	Distritos	Estuário	Estrada	Principal cidade	Áreas urbanas	
Leitos naturais	1								0.0351
Para o mar	3	1							0.0423
Mercado	5	5	1						0.1949
Distritos	3	3	1/5	1					0.0599
Estuário	5	5	1/3	5	1				0.1333
Estrada	1	3	1/3	1	1/3	1			0.0502
Principal cidade	5	5	1	5	3	7	1		0.2357
Áreas urbanas	3	3	3	3	3	7	1	1	0.2486
Pesos	1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	
Níveis	Extremamente	Muito forte	Fortemente	Moderadamente	Igualmente	Moderadamente	Fortemente	Extremamente	
	1	2	3	4	5	6	7	8	



Menos importante **Mais importante**

Fonte: Elaboração própria, baseado em Sousa *et al*, 2012.

Todos os fatores padronizados difusos foram pareados em uma matriz de comparação para cada cultivo. Nestes modelos há um desenvolvimento de procedimento de ponderação em que os pesos são baseados em uma matriz de comparação de pares de acordo com o Processo de Análise Hierárquica – AHP de Saaty (1977), que é uma das técnicas de ponderação mais comuns na Avaliação Multicritério (MCE). O autovetor principal da comparação de pares é analisado para produzir um conjunto de pesos que somam 1. Na matriz de comparação de pares, a importância relativa dos critérios é avaliada em uma escala contínua a partir do menos importante (1/9, 1/7, 1/5... 1/3) para o mais importante (1, 3, 5... 9). Esse procedimento possibilitou o cálculo da razão de consistência para distribuição dos pesos entre os fatores. Obtém-se uma razão de consistência de 0,0 a 0,1, considerada aceitável para distribuição de peso de cada critério ou fator (SAATY, 1977; BANAI-KASHANI, 1989; RADIARTA *et al.*, 2008; SOUSA *et al.*, 2012).

Os fatores e seus pesos resultantes no AHP foram então usados no módulo MCE no ambiente SIG para identificar áreas viáveis para o cultivo de macroalgas (RADIARTA *et al.*, 2008, EASTMAN, 2012 e SOUSA *et al.*, 2012). A gama de características da área foi dividida em oito classes, em uma escala que abrange áreas altamente adequadas, moderadamente adequadas até pouco adequada para cada área identificada como viável ao cultivo.

A imagem resultante desta análise (Figura 10) foi reclassificada em oito níveis, da área mais apropriada (oito) a menos apropriada (um). A combinação de todos os parâmetros de natureza física, social e de infraestrutura operacionais para o cultivo de macroalgas mostrou que 53,67% das áreas analisadas foram classificadas com 8 e 7 (altamente adequado), 40,93% com 6 e 5 (moderadamente adequado) e apenas 5,40% das regiões receberam escores de 4 (pouco adequadas). A Figura 10 apresenta a seleção e hierarquização de áreas com aptidão para o desenvolvimento do cultivo de macroalgas da espécie *Gracilaria birdiae* no litoral do estado do Rio Grande do Norte, construída a partir dos valores apresentados em Sousa *et al.* (2012).

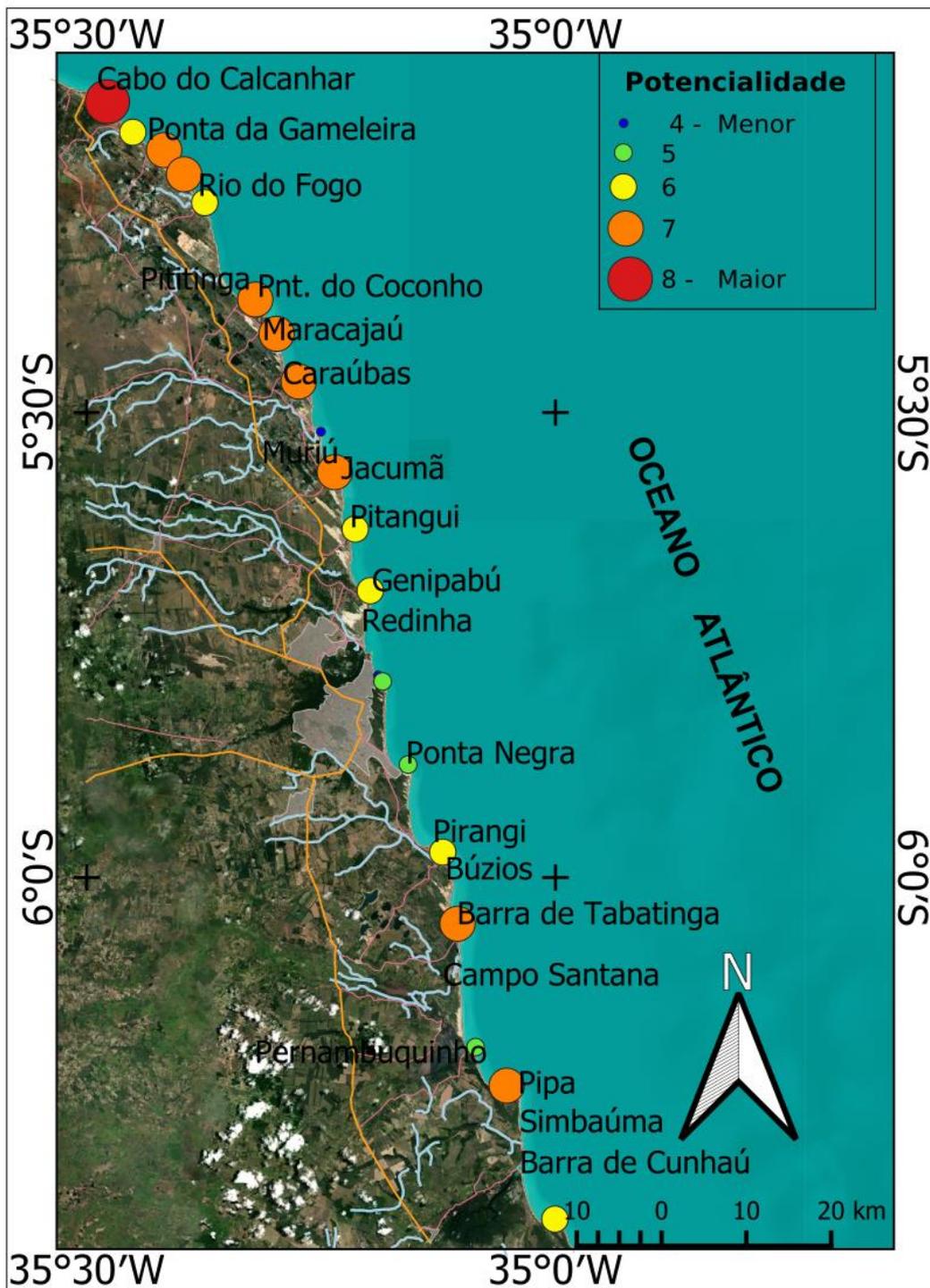


Figura 9 - Mapa de aptidão para o desenvolvimento do cultivo de macroalgas da espécie *Gracilaria birdiae* no litoral do RN – Brasil.

Fonte: Elaboração própria baseado em Sousa et al., 2012.

Na Avaliação Multicritério (MCE) quando da identificação de áreas apropriadas ao desenvolvimento das macroalgas, Sousa *et al.* (2012) fizeram uso de variáveis consideradas fundamentais ao cultivo. De acordo com os autores as variáveis de maiores pesos para determinar a potencialidade de cultivo foram a distância dos locais de cultivo

até as áreas urbanas, distância à cidade principal, distância do mercado e a distância dos estuários. Os menores pesos obtidos foram para distância dos distritos, estradas, costas abrigadas e banco de macroalgas.

Nesta tese incorporou-se à análise, indicadores de vulnerabilidade socioeconômica e ambiental como critérios utilizados na consideração do nível de sustentabilidade das áreas identificadas. A Figura 11 sintetiza o processo de modelagem realizado.

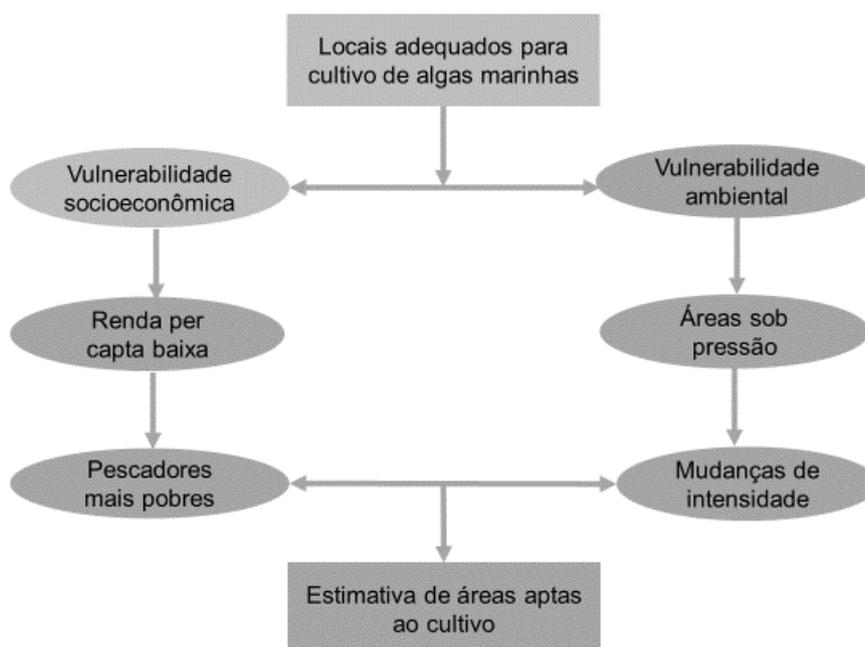


Figura 10 - Fluxo da modelagem espacial com a incorporação de critérios de vulnerabilidade socioeconômica e ambiental para identificação de áreas de cultivo com maior aptidão
Fonte: Elaboração própria

3.2.1 Indicadores de Vulnerabilidade Socioeconômica e ambiental

Como critérios para identificação de áreas de vulnerabilidade social e ambiental foi utilizada a Análise de Detecção de Mudanças por meio de dados de sensoriamento remoto temporal (ASOKAN; ANITHA, 2019). Nesta abordagem, as áreas são classificadas a partir dos níveis de mudanças detectados, sendo as de maiores níveis de mudança classificadas como "mais vulneráveis", já as áreas de menor nível de mudanças ou mais estáveis, foram consideradas como áreas "menos vulneráveis".

A variação temporal é compreendida pelas diferentes respostas espectrais dos ambientes detectados em imagens de satélite, que são padronizados estatisticamente por parâmetros espacializados obtidos pela Análise de Componentes Principais (PCA). Esta técnica estatística, além de resumir o conjunto de dados por meio de matriz de autocorrelação e de autovetores entre as variáveis, tem sido utilizada para compreender os padrões de variâncias em número de componentes extraídos.

A maior parte das variâncias que compreendem a Primeira Componente Principal (PC1) sintetizam os dados demonstrando que os maiores vetores de autocorrelação identificam padrões comuns ou correlacionáveis entre as variáveis. Por outro lado, o conjunto de variâncias que não se correlacionam entre as variáveis, corresponde às variâncias extraídas pela Segunda Componente Principal (PC2) (EASTMAN, 2012). Neste caso a PC2 possibilitou determinar o conjunto de variâncias mais significativas em torno das distribuições das variâncias da PC1. A PC2 foi extraída individualmente para demonstrar os níveis de variação de cada ambiente ao longo do tempo.

Duas cenas do satélite Landsat do ponto e órbita (214/064) do sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)⁷ de 04/08/2001 e Operational Land Imager (OLI)⁸ de 23/08/2017, com resolução espacial de 30m, foram utilizadas para a análise de detecção de mudanças. A banda 3 do Landsat 7 ETM+ e a banda 4 do Landsat 8 OLI correspondem a faixa do espectro visível do vermelho (NASA, 2011). Esta porção do espectro é capaz de detectar uma ampla faixa dos comportamentos de reflexão de água, rochas, solos, vegetação e áreas urbanas. Sendo a comparação destas cenas, em escala de tempo, o elemento usado na detecção das mudanças sobre os compartimentos que formam o ambiente (CHACON *et al.*, 2016).

As imagens orbitais do Landsat 7 e 8 foram pré-processadas no nível L2 onde foram submetidas a correção atmosférica e disponibilizadas pela web no sítio da U.S. Geological Survey (USGS)/EarthExplorer (USGS, 2018). Contudo, outros parâmetros

⁷ O sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) é o sensor que está a bordo do satélite Landsat 7, lançado em 1999 e representa uma evolução do sensor anterior ETM (Enhanced Thematic Mapper). Este instrumento foi capaz de ampliar as possibilidades de uso dos produtos Landsat, oferecendo a versatilidade e eficiência obtidas nas versões anteriores, porém, com uma acurácia melhor do sistema (EMBRAPA, 2020).

⁸ O sensor OLI (Operational Land Imager), presente no satélite Landsat 8, lançado em 11/02/2013, dará continuidade aos produtos gerados a partir dos sensores TM e ETM+, a bordo das plataformas anteriores. Este novo sensor OLI, inclui duas novas bandas espectrais, uma projetada para estudos de áreas costeiras e outra para detecção de nuvens do tipo cirrus (EMBRAPA, 2020).

como a vida útil do sensor, podem levar a variações do padrão de reflectância dos alvos, quando as imagens são comparadas em tempos diferentes. A técnica de processamento digital de imagens orbitais que mais tem sido utilizada para remover estas variações é a Análise de Componentes Principais (ACP) (CARVALHO *et al.*, 2000; JUNIOR *et al.*, 2018).

Neste caso, a banda 3 do Landsat 7 ETM+ e banda 04 do Landsat 8 OLI, foram combinadas/fusionadas, e destas extraídas duas Componentes Principais (CPs). A Primeira Componente Principal (PC1) responde pela maior variância e autocorrelação entre as bandas, indicando as semelhanças de comportamento das respostas espectrais entre as bandas. Já a Segunda Componente Principal (PC2) foi utilizada como a imagem de detecção de mudança, porque descreve as variâncias das reflectâncias que não possuem correlação entre as bandas analisadas.

A imagem da PC2 foi classificada em níveis de mudanças, sendo o histograma da frequência de classes de valor de pixels dividido em 04 partes, com o objetivo de identificar a variação normal das modificações que caracterizam as mudanças mais acentuadas (CARVALHO *et al.*, 2000). Assim os valores que estão entre a média e o desvio padrão ($X \pm SD$) foram classificados como as variações normais entre os anos de 2001 e 2017. Por outro lado, os valores da classe dentro dos limites entre $X \pm SD$ e $X \pm 2SD$ foram classificados como o primeiro nível de mudanças (mudanças suaves). Já os valores encontrados entre $X \pm 2SD$ até os extremos (valor máximo e mínimo) foram classificados como o segundo nível de mudanças (mudanças extremas).

Neste caso, o algoritmo de custo de distância teve o coeficiente de atrito inversamente proporcional a classe de vulnerabilidade, sendo aplicados os coeficientes de atrito 1,0 para as áreas que caem dentro do 2º limite de mudanças acentuadas e 2,0 para as que se localizam dentro do 1º limite de mudanças acentuadas. Já o coeficiente de atrito 10,0 foi aplicado para as demais áreas que não possuem áreas vulneráveis.

A imagem classificada da PC2 foi utilizada para produzir um mapa de vulnerabilidade ambiental, sendo excluídas as classes de variação normal, e mantidas apenas as classes de mudanças acentuadas. Cada classe de mudança acentuada foi levada em consideração para produzir uma Superfície de Custo de Distância (SCD), tendo maior peso as áreas de cultivos que estão localizadas próximas às áreas mais vulneráveis ou com maior intensidade de mudanças.

A Figura 12 mostra a SCD hipotética das áreas de suaves mudanças (A), a aquelas de extremas mudanças (B), ou seja, áreas que variam da menor a maior

vulnerabilidade, localizadas próximas às áreas de cultivos (1), (2) e (3). Os tons vermelhos escuros se referem às menores distâncias das áreas mais vulneráveis (B – menor coeficiente de atrito), os tons vermelhos claros (A - maior coeficiente de atrito), já os tons azuis (mais distantes das áreas A e B) máximo coeficiente de atrito. A área de cultivo (2) possui menor atrito e custo de distância para (A) e (B), a área (1) tem maior atrito que a área (2), e a área (3) possui maior atrito que as áreas (1) e (2).

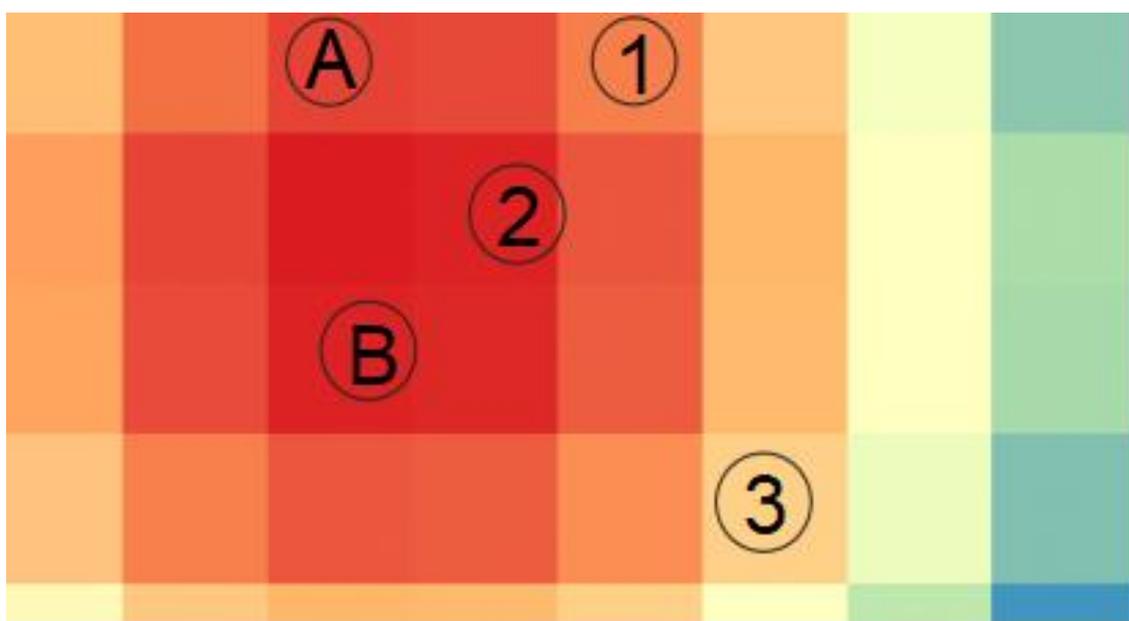


Figura 11 - Superfície de Custo de Distância (SCD) hipotética
Fonte: Autora

Este procedimento possibilitou a criação de uma SCD entre as áreas de vulnerabilidade ambiental e as áreas de cultivo com maior peso (coeficiente de atrito menor e, conseqüente, menor custo de distância), sendo estas as áreas de cultivo mais próximas daquelas que sofreram mudanças mais relevantes entre os anos de 2001 e 2017. O suporte lógico utilizado para a produção do mapa de custo de distância foi o IDRISI Selva (EASTMAN, 2012).

Este cenário tem como premissa que as áreas de cultivos próximas às áreas de maior vulnerabilidade ambiental, tem sua população sob pressão às mudanças, como por exemplo a erosão costeira, desmatamento, movimentos das dunas, aumento da urbanização nas áreas costeiras, entre outras. Sendo assim sujeitas a mudanças mais intensas, o que favorece a atividade de cultivo de macroalgas, dando a esta um maior peso na promoção da sustentabilidade local, através da mitigação de impactos

socioambientais fixando as populações pesqueiras que tem na atividade uma fonte de renda, conforme apresentado na Figura 11.

É mister atentar para o fato de que as populações costeiras, potencialmente disponíveis para a atividade de cultivo de algas não dispõem de capital cultural e financeiro que favoreça o seu acesso ao crédito e assistência técnica, ficando assim, vulneráveis aos ditames do mercado.

Migrações significativas de populações residentes no interior para o litoral, motivadas por novas oportunidades de trabalho e renda, onde o turismo se destaca fortemente como atrativo, têm intensificado os conflitos sociais causados pela vulnerabilidade socioeconômica da região, deteriorando ainda mais as condições de vida das comunidades costeiras e colaborando para uma progressiva depleção dos bancos de algas e dos estoques aptos a pesca.

A inexistência de um manejo adequado também contribui para a extinção dos bancos naturais de algas, o que torna imperativo, em um processo de incentivo à Algacultura, à implementação de cultivos experimentais orientados a atuarem como auxílio práticos e ao apoio técnico ao desenvolvimento e à implementação de cultivos familiares e restauração de bancos naturais.

Portanto, é fundamental, para que se minimize os riscos e potencialize os ganhos da promoção do cultivo de algas na área de estudo, que seja desenhada uma política pública orientada à geração de emprego, renda e fixação das populações nas áreas costeiras, devendo esta ser aderente às demandas socioeconômicos e ambientais dessa atividade.

Também foi considerado como critério para a sustentabilidade dos cultivos, a condição social das populações locais. Para tanto, o principal indicador utilizado foi a Renda Familiar Per Capta ou Renda Domiciliar disponibilizado pela Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua – PNAD – (PNAD, 2008). A distribuição de renda é um parâmetro que permite avaliar como se dá a repartição das riquezas e as condições de acesso a bens e serviços das populações. No Brasil, os mais vulneráveis, em termo de renda familiar ou domiciliar, são aqueles que auferem um valor inferior ao salário mínimo nacional (cerca de U\$250.00, base junho 2019), estabelecido como necessário a manutenção de uma família de quatro pessoas (BRASIL, 2012). Os dados referentes às rendas domiciliares foram extraídos da PNAD (IBGE, 2021).

O arquivo vetorial de pontos que identificou as populações e sua renda familiar foram espacializados pelo Método de Triangulação de Voronoi. Esta técnica é

amplamente empregada para decomposição de dados ou fenômenos sociais de um determinado espaço (SILVA; BACHA, 2011). Os polígonos gerados foram convertidos da forma vetorial para matricial gerando uma superfície contínua de renda familiar das localidades próximas às áreas de cultivo.

3.2.2 Indicadores da Sustentabilidade Socioeconômica e ambiental

A imagem referente a Superfície de Custo de Distância (SCD) das áreas com maior intensidade de mudança, ou seja, de maior vulnerabilidade ambiental, foram padronizadas numa escala de 0 a 255 por uma função linear monotonicamente (gradualmente) decrescente. Para tanto, considerou o valor 255 para as áreas de maior vulnerabilidade próximas as áreas de cultivo; o valor 255 sofreu uma continua redução até às áreas situadas a 5km de distância, chegando ao menor valor 0. Este parâmetro de distância considerou a possibilidade das comunidades acessarem as potenciais áreas de cultivo situadas até 5km de distância da comunidade de pescadores. Nestes termos distâncias maiores conformam-se em uma restrição ao acesso da comunidade de pescadores aos locais de cultivo.

Da mesma forma, a imagem referente a superfície contínua de renda familiar das comunidades, ou seja, áreas de cultivos que estão próximas às comunidades de pescadores de acordo com sua renda familiar, foram padronizadas. A função monotônica linear decrescente utilizada padronizou os valores de renda de 0 a 255. Os valores foram escalonados de 255, a partir de uma renda de U\$250,00 ou inferior. Para rendas superiores a U\$250,00, os valores tenderam a ser próximos de 0.

As imagens padronizadas foram combinadas de forma a obter a média ponderada entre estas, sendo dados os mesmos pesos para a imagem de vulnerabilidade ambiental e social (0,5). A imagem resultante consistiu em uma superfície de valores de 0 a 255, onde os valores mais próximos ou igual a “255” indicaram as áreas que possuem maior vulnerabilidade socioeconômica e ambiental, já os valores próximos ou igual a “0”, indicam áreas de menor vulnerabilidade.

A produção do mapa de sustentabilidade socioeconômica e ambiental de cultivo de macroalgas foi baseada na reclassificação, em oito classes, entre os valores de 0 a 255 da imagem resultante. A sobreposição da imagem classificada com as áreas de cultivos delimitadas por Sousa *et al.* (2012), e suas classes de potencialidades permitiu,

por meio da classificação cruzada, identificar e quantificar proporcionalmente, dentro das áreas de cultivo, àquelas que refletem as condições de maior sustentabilidade socioeconômica e ambiental em relação a área contígua de cultivo. Isto se percebe que os trabalhos de Sousa *et al.* (2012) foram revelados com áreas de potencialidades contíguas, mas que em nível de sustentabilidade possuem potencialidades diferentes.

A quantificação dessas áreas de classificação cruzada possibilitou incorporar na avaliação o apelo econômico e ambiental do potencial produtivo de cada área. Permitindo, dessa forma, assumir o pressuposto de que nas áreas de maior atrativo à sustentabilidade as populações locais tendem a se integrarem mais ao cultivo de macroalgas, devido a expectativa de que essa atividade fomente a geração de emprego e renda às comunidades locais, bem como, promova a mitigação dos impactos ambientais registrados nessas áreas, já classificadas como mais susceptíveis a mudanças antrópicas e naturais.

O pressuposto assumido demanda para sua materialização que as comunidades possam ter acesso a programas de formação e capacitação nas áreas técnica, econômico-financeira e ambiental, bem como de assistência técnica. Vale ressaltar ainda que o Brasil segue registrando conflitos vinculados a posse e uso de suas terras, o que torna necessário a estruturação de um regramento legal que garanta às populações locais o pleno acesso e uso das áreas necessárias à atividade da Algacultura.

3.3 Estimativa do Potencial Produtivo da Biomassa de Macroalgas *Gracilaria birdiae*

O cultivo de *Gracilaria* acontece em várias regiões do mundo e de forma variada quanto aos métodos usados (GARCÍA-POZA *et al.*, 2020). Estas macroalgas podem ser cultivadas vegetativamente:

- I. em águas abertas no fundo de baías, estuários ou recifes;
- II. em linhas, cordas ou redes;
- III. em lagoas;
- IV. em tanques.

Os três primeiros métodos, (I) a (III), são os mais amplamente utilizados (McHUGH, 2003) .

A estimativa do potencial produtivo de biomassa de Macroalgas em t/ha/ano, toma como referência o sistema de plantio realizado na Praia de Pitangui/RN, de acordo com (ANDRADE NETO, 2015). Nesta área, o cultivo é feito através do uso de um Sistema Modular de Balsas (SMB), onde cada balsa mede 18 x 3 metros, sendo formada por 6 módulos de 3 x 3 metros (Figura 15). Em cada módulo existem 6 redes tubulares que acomodam a alga para crescimento e posterior coleta. As balsas foram produzidas com canos de PVC com tampas (estrutura que já serve de flutuador), cordas de nylon 8 mm, cordas de seda 6 mm, redes tubulares e a estrutura de fixação da balsa flutuante consiste em âncora confeccionada com pneus reciclados e concreto (Figura 16).

No SMB, uma balsa tem potencial estimado de produção de 146 kg de biomassa fresca por ciclo produtivo. Considerando a área ocupada por uma balsa (54 m²) e a área necessária para o manejo das macroalgas (espaçamento de 2 m entre as balsas), um hectare comporta a instalação de 100 balsas, ocupando uma área de plantio de 5.400m² ou 0,54 ha. Nesta área é possível produzir 14,6 t de biomassa fresca por ciclo de cultivo. Considerando uma real possibilidade de realização de seis ciclos de cultivo por ano, tem-se uma estimativa de um potencial produtivo de 87,6 t/ha/ano (ANDRADE NETO, 2015). A Figura 13 apresenta a estrutura do Sistema Modular de Balsas (SMB) aplicado nas áreas de cultivos instaladas na Praia de Pitangui/RN e usado como referência nas estimativas realizadas.

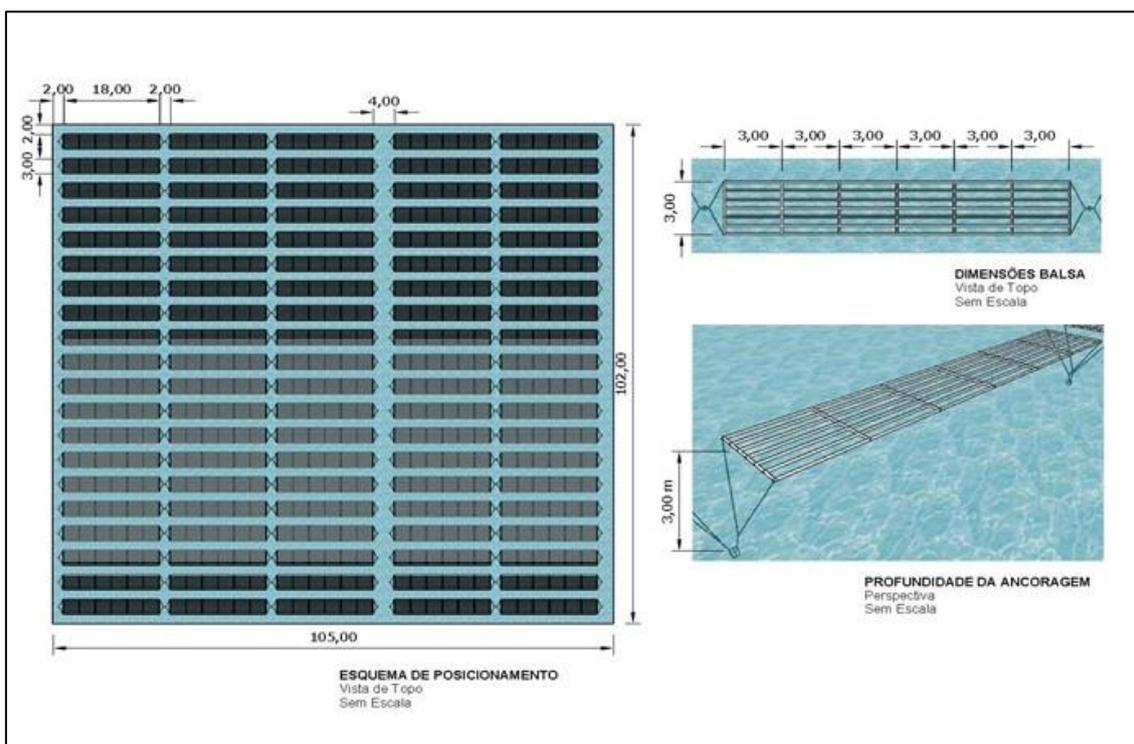


Figura 12 - Desenho esquemático do SMB flutuantes utilizadas no cultivo de *Gracilaria birdiae* na Praia de Pitangui /RN, Brasil
 Fonte: Autora

A disposição das balsas na configuração apresentada pelo SMB, respeitando-se o espaçamento entre elas, ocupa uma área total de 1 ha com uma produção anual de 87,6 t. A Figura 14 apresenta a disposição das balsas flutuantes do SMB para cultivo de *Gracilaria birdiae* no litoral Oriental do RN.

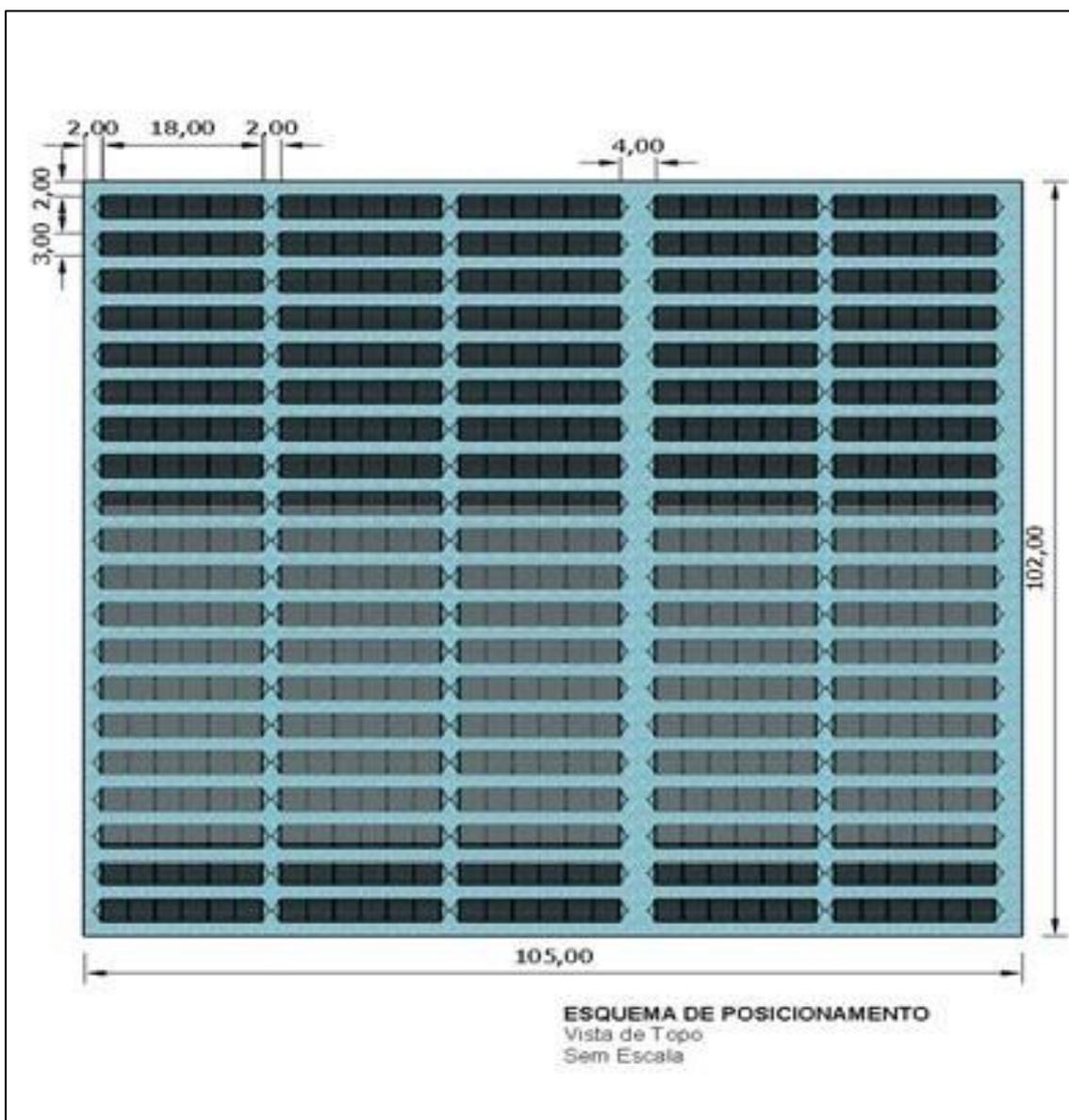


Figura 13 - Desenho esquemático da disposição das balsas no SMB flutuantes utilizadas no cultivo de *Gracilaria birdiae* na Praia de Pitangui /RN, Brasil
Fonte: Autora

A balsa flutuante mede 18 metros de comprimento por 3 metros de largura, sendo formada por 6 módulos de 3 por 3 m. Em cada módulo existem 6 redes tubulares, onde as algas são colocadas para crescimento. Cada balsa descrita anteriormente possui a capacidade produtiva estimada de 146 kg de biomassa fresca por ciclo produtivo. Considerando-se seis ciclos produtivos anuais, cada balsa tem potencial produtivo de 876 kg de biomassa fresca por ano. A Figura 15 apresenta a balsa flutuante utilizada no cultivo artesanal na Praia de Pitangui, no município de Extremoz/RN.

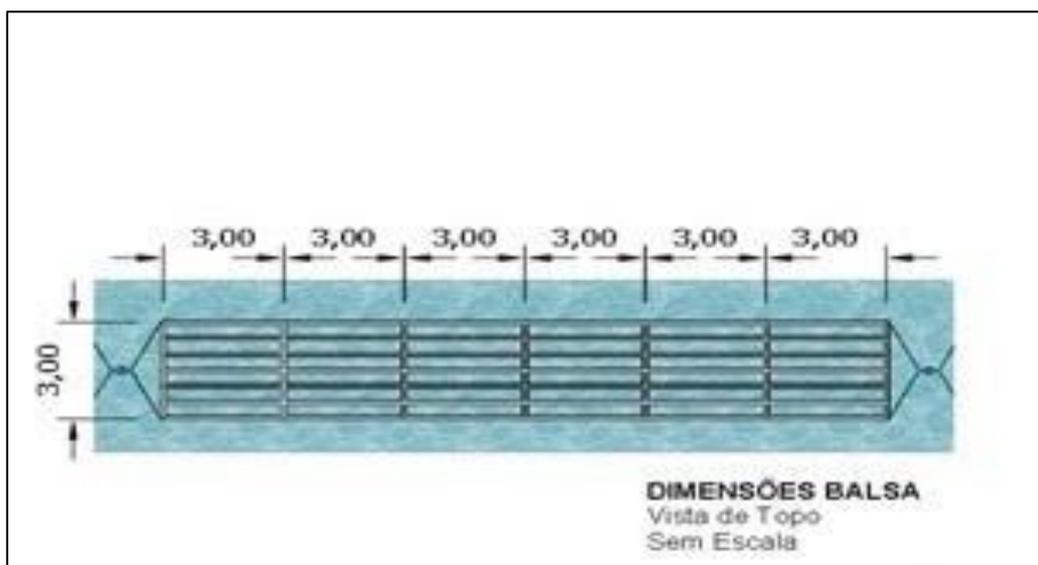


Figura 14 - Desenho esquemático da balsa flutuante utilizada no cultivo de *Gracilaria birdiae* na Praia de Pitangui /RN, Brasil.
Fonte: autora

A ancoragem das balsas é feita com blocos de concreto e reutilização de materiais como pneus. A Figura 16 apresenta a forma de fixação das balsas para cultivo de algas na Praia de Pitangui, no município de Extremoz/RN.

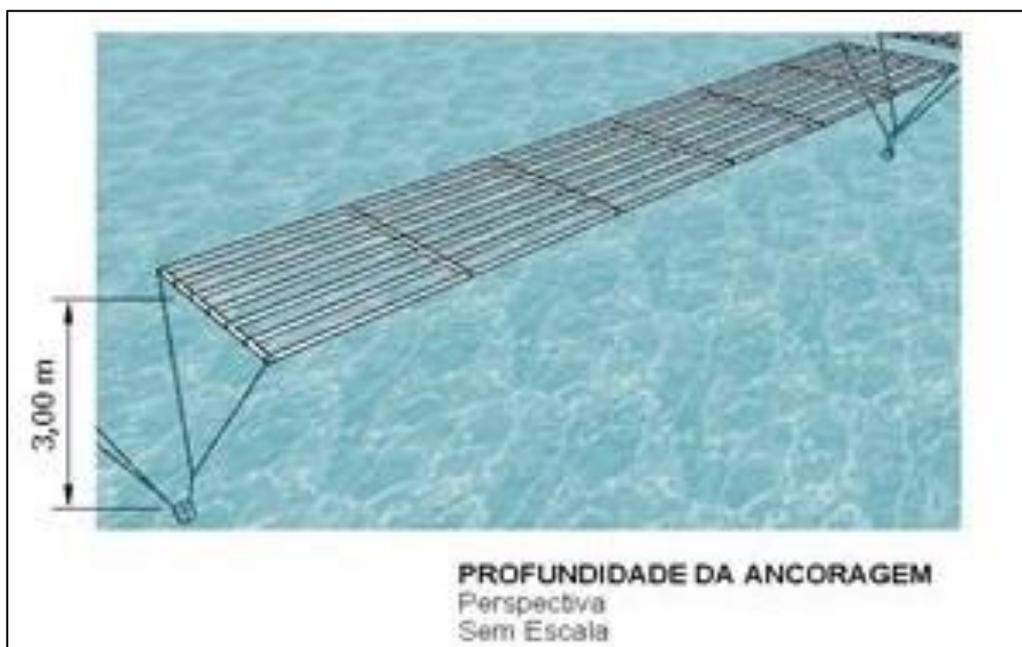


Figura 15 - Desenho esquemático da ancoragem das balsas no SMB utilizada no cultivo de *Gracilaria birdiae* na Praia de Pitangui /RN, Brasil
Fonte: Autora

O SMB usado como base para realizar a estimativa do potencial produtivo da biomassa se justifica pelo mesmo apresentar baixo custo de fabricação, manutenção e simplicidade de instalação. Este sistema de cultivo vem sendo tradicionalmente utilizado na Costa Oriental e Setentrional do estado do RN (BEZERRA; SORIANO, 2010), região que apresenta baixo IDH, baixa renda familiar per capita, o que se traduz em uma elevada vulnerabilidade social da população. Dessa forma, o SMB, encontra grande aceitação, devido seu atrativo de promover geração de emprego e renda nas áreas de cultivos, a exemplo do que ocorre nas praias de Pitangui e Rio do Fogo /RN, Brasil.

3.4 Estimativa do Potencial Produtivo de Bioprodutos da biomassa de *Gracilaria birdiae*

3.4.1 Bioetanol

A estimativa da produção do bioetanol considera a biomassa a ser ofertada a partir do cálculo de seu potencial produtivo, como definido no item 3.3. Os volumes de bioetanol possíveis de serem alcançados através do cultivo das macroalgas da espécie *Gracilaria birdiae*, são obtidos a partir do estudo apresentado por Andrade Neto (2015), quando do desenvolvimento do processo metodológico de hidrólise para produção de bioetanol. Considerando a eficiência de 58% obtida no processo de fermentação, Andrade Neto (2015) estima o equivalente a 360 litros de etanol possíveis de serem extraídos em uma tonelada de biomassa residual, ou seja massa fermentável, composta por polissacarídeos a serem hidrolisados e fermentados.

A obtenção da biomassa residual se dá pela secagem da biomassa fresca, na proporção de 1 t de biomassa fresca para 0,1 t na forma seca. A forma seca (resultado da secagem ao sol) ainda contém de 20 a 25% de água, o que demanda o uso de estufa ou outro método de secagem para concluir o processo de desidratação total, que quando finalizado resulta em 0,08 t de biomassa desidratada (ANDRADE NETO, 2015). O volume de biomassa desidratada contém 0,03 t de polissacarídeos fermentáveis. Dessa forma, uma tonelada de biomassa residual requer 33,33 t de macroalgas frescas.

Fazendo o caminho inverso tem-se que uma tonelada de biomassa fresca pode fornecer, pelo processo desenvolvido por Andrade Neto (2015), 10,8 l de etanol.

3.4.2 Biofertilizante

Entende-se por biofertilizante o produto que contém princípio ativo ou agente orgânico, isento de substâncias agrotóxicas, capaz de atuar, direta ou indiretamente, sobre o todo ou parte das plantas cultivadas, elevando a sua produtividade, sem ter em conta o seu valor hormonal ou estimulante, conforme define a legislação brasileira em seu Decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004 (BRASIL, 2004).

A extração do biofertilizante a partir das macroalgas se dá por um processo de trituração e filtragem da biomassa fresca (GELLI *et al.*, 2020). Dessa forma, o seu potencial produtivo é estimado a partir da biomassa ofertada como definido no item 3.3. Gelli (2019) mostra que o rendimento na produção de biofertilizante varia, segundo as condições de extração e espécies de macroalgas vermelhas, podendo alcançar 70% por quilo de alga fresca para as linhagens adaptadas no Brasil. A prática realizada na área de cultivo de Pitangui /RN, apresentada pela Associação de Maricultura e Beneficiamento de Algas (AMBAP), revela um aproveitamento de 50% da biomassa fresca, em peso, rendimento este aplicado nas estimativas feitas nesta pesquisa.

3.4.3 Ágar

O Ágar é um biopolímero, formado pelos polissacarídeos agarose e agarpectina, considerado um ficocolóide natural encontrado em ambiente marinho, de alto valor comercial GURGEL *et al.* (2018), possível de ser extraído de várias espécies de macroalgas vermelhas pertencentes à classe Rhodophyta Torres *et al.* (2019), estando presente na parede celular delas (RIOUX; TURGEON, 2015). Os gêneros *Gelidium* e *Gracilaria* são as fontes mais exploradas na sua extração (WHITE; WILSON, 2015), porém o gênero *Gracilaria* popularizou-se para este fim, devido a facilidade de cultivo (SORIANO, 2017; QIN, 2018), de forma que 80% da produção mundial de Ágar advém do gênero *Gracilaria* (TORRES *et al.*, 2019).

O Ágar é muito usado no processamento de alimentos por causa de suas propriedades de gelificação e estabilização. O Ágar forma um gel em baixas concentrações, normalmente entre 0,5% e 2% em produtos alimentícios e em uma ampla faixa de pH. É solúvel em água quente e, ao resfriar o que acontece entre 32 °C e 43 °C, forma um

gel que tem a capacidade de se manter estável até a temperatura de 85 °C, sendo esta característica muito apreciada pela indústria alimentícia (RIOUX; TURGEON, 2015).

A extração do Ágar realiza-se através da lavagem da alga, de forma remover as impurezas aderidas, sendo depois toda a biomassa imersa em água e aquecida. Nesse processo o Ágar dissolve-se na água e a mistura resultante é filtrada para remover resíduos que eventualmente ainda existam. A mistura obtida – “o filtrado”, ainda quente, é arrefecido formando um gel. O gel, por ser bastante demandado pela indústria alimentícia, confere a esse bioproduto um alto valor comercial (McHUGH, 2003). O Ágar é ofertado em diferentes formas: em pó, flocos, barras e fios, as quais são empregadas de acordo com a destinação do produto (WHITE; WILSON, 2015).

As macroalgas do gênero *Gracilaria* necessitam de um pré-tratamento destinado a potencializar o gel a ser obtido. O mesmo pode ocorrer de diferentes formas: em meio alcalino, a quente ou a frio, em meio ácido ou também em meio ácido seguido da adição e extração em CaCl_2 (FERREIRA, 2015). No que concerne ao pré-tratamento em meio alcalino, este justifica-se por promover uma alteração química no Ágar de *Gracilaria*, permitindo a obtenção de um Ágar com um elevado “poder de gel” (McHUGH, 2003). Na ausência desse pré-tratamento, a maioria das espécies de *Gracilaria* produzem um Ágar com uma força de gel de baixo atrativo comercial (McHUGH, 2003).

Os valores dos rendimentos relativos à extração do Ágar das Rhodophytas do gênero *Gracilaria*, com pré-tratamento alcalino, são encontrados na literatura dentro de uma faixa que varia de 22% a 47% (Bezerra; SORIANO, 2010; FERREIRA, 2015). Esta variação reflete a influência de mudanças nos parâmetros climáticos e ambientais (McHUGH, 2003; BEZERRA; SORIANO, 2010). Nesse cenário, o potencial produtivo do Ágar é obtido utilizando-se da estimativa da biomassa ofertada como definida no item 3.3. Considera, para tanto, os limites inferiores e superiores dos rendimentos apresentados nas referências utilizadas, a saber: 22% e 47%.

CAPÍTULO IV – POTENCIALIDADES DA ATIVIDADE DE CULTIVO DE MACROALGAS, NO LITORAL ORIENTAL DO RIO GRANDE DO NORTE

4.1 Sustentabilidade Socioeconômica e ambiental das potenciais áreas de cultivo

A análise de detecção de mudanças referentes às imagens orbitais do Landsat 7 ETM+, 04/08/2001, e Landsat 8 OLI, 23/08/2017, dada pela segunda Componente Principal (PC2), mostra que as áreas que registraram mudanças mais intensas no Rio Grande do Norte foram aquelas situadas sobre a faixa costeira, sendo os campos de dunas e as zonas de praias onde o fenômeno é mais evidente.

A Figura 16 realça as áreas onde se registraram as maiores mudanças no meio ambiente. Nela, as manchas amarelas referem-se às áreas mais susceptíveis ou vulneráveis, face às mudanças ambientais registradas entre os anos de 2001 a 2017, nas áreas próximas às localidades de potencial cultivo.

Nestas áreas as mudanças assinaladas resultam de em um processo erosivo que segue afetando esses espaços. As mesmas, caracterizadas na pesquisa como “mudanças ambientais”, se devem à elevação do nível do mar e à redução de aporte de sedimentos ocasionado pelas barreiras antrópicas, a exemplo da ocupação desordenada das faixas de praias e de dunas. Neste contexto, o processo erosivo tende a se agravar em função das mudanças climáticas (VITAL *et al.*, 2016).

No que concerne à vulnerabilidade social, a maioria das localidades investigadas se enquadraram na faixa de renda familiar mensal inferior a um salário mínimo nacional, com esta renda variando de U\$25.00 a U\$550.00/mês (IBGE, 2021). Destaca-se que as comunidades pesqueiras mais afastadas dos centros urbanos e de menor influência da atividade de turismo, são as que registram os menores valores dessa renda. A Figura 17 também expõe a distribuição da renda familiar mensal das populações residentes em localidades situadas próximas às áreas com potencialidade de cultivo.

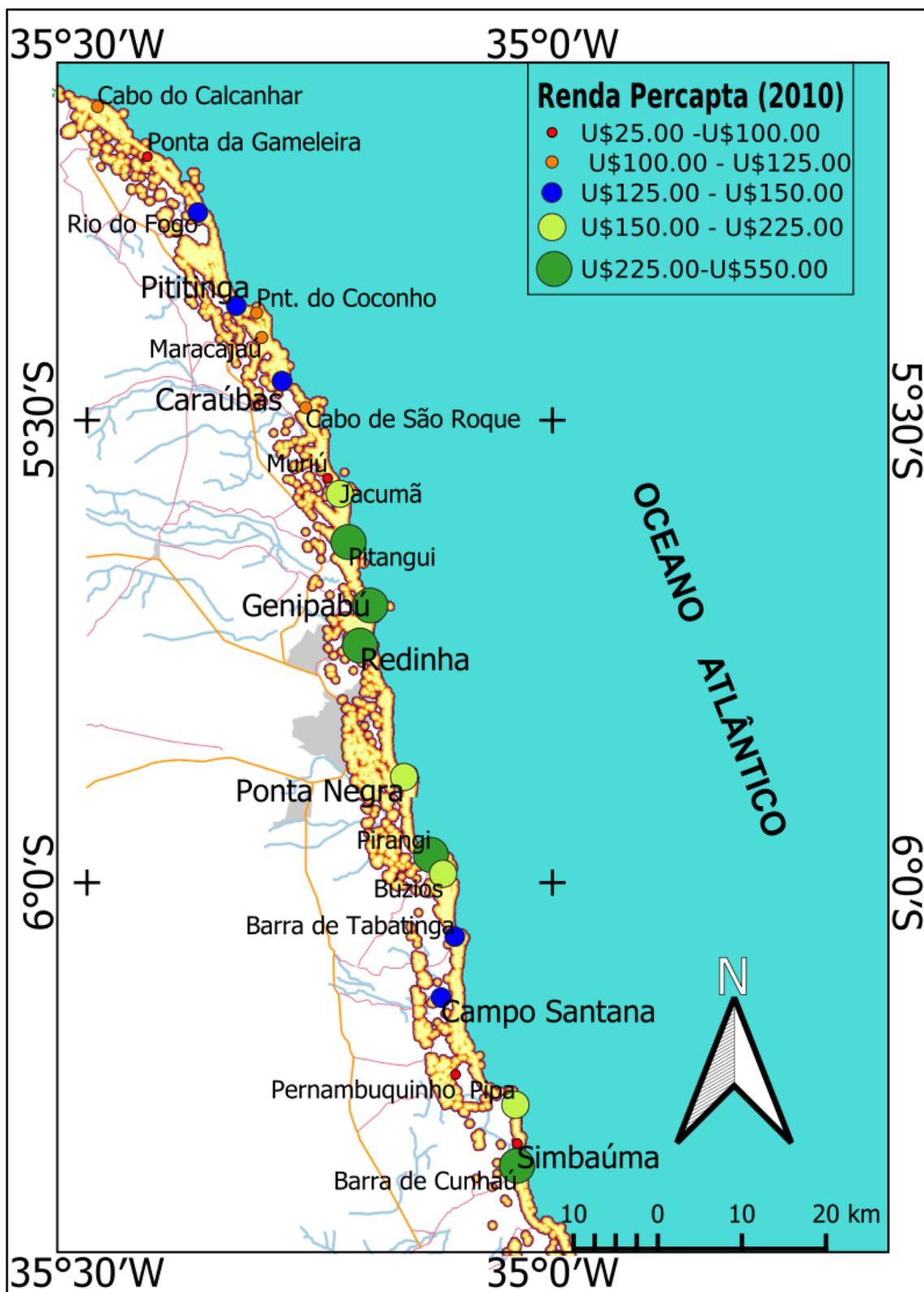


Figura 16 - Litoral Oriental do RN destacando as áreas de maiores mudanças ambientais (machas amarelas com contornos vermelhos), sobrepostas pela distribuição da renda familiar da população localizada nos distritos próximos às áreas com potencial de cultivo.
 Fonte: Autora

A análise da sustentabilidade nas áreas com potencialidade de promoção do cultivo de macroalgas investigada permite inferir que aquelas de maior vulnerabilidade socioeconômica e ambiental estão mais concentradas nas localidades situadas ao norte da zona urbana da cidade de Natal, capital do estado. Nessas, além do intenso processo erosivo da faixa de praia, as dunas foram ocupadas por grandes projetos de aproveitamento eólico que utilizam torres de altura média de 100 m e aerogeradores de potência média de 1,5 MW, o que se refletiu na detecção de mudanças dadas pelas imagens orbitais. Apontando, nesses espaços, uma concentração de mudanças ambientais mais extremas.

A Figura 18, por sua vez, apresenta as classificações das áreas costeiras pelo nível de vulnerabilidade socioeconômica e ambiental adotado. Nela, as manchas em cinza compreendem as áreas urbanas e os pontos em laranja, referem-se às áreas propícias ao cultivo de macroalgas. Este mapa permite inferir que na região oriental encontram-se as áreas de maior vulnerabilidade socioeconômica e ambiental.

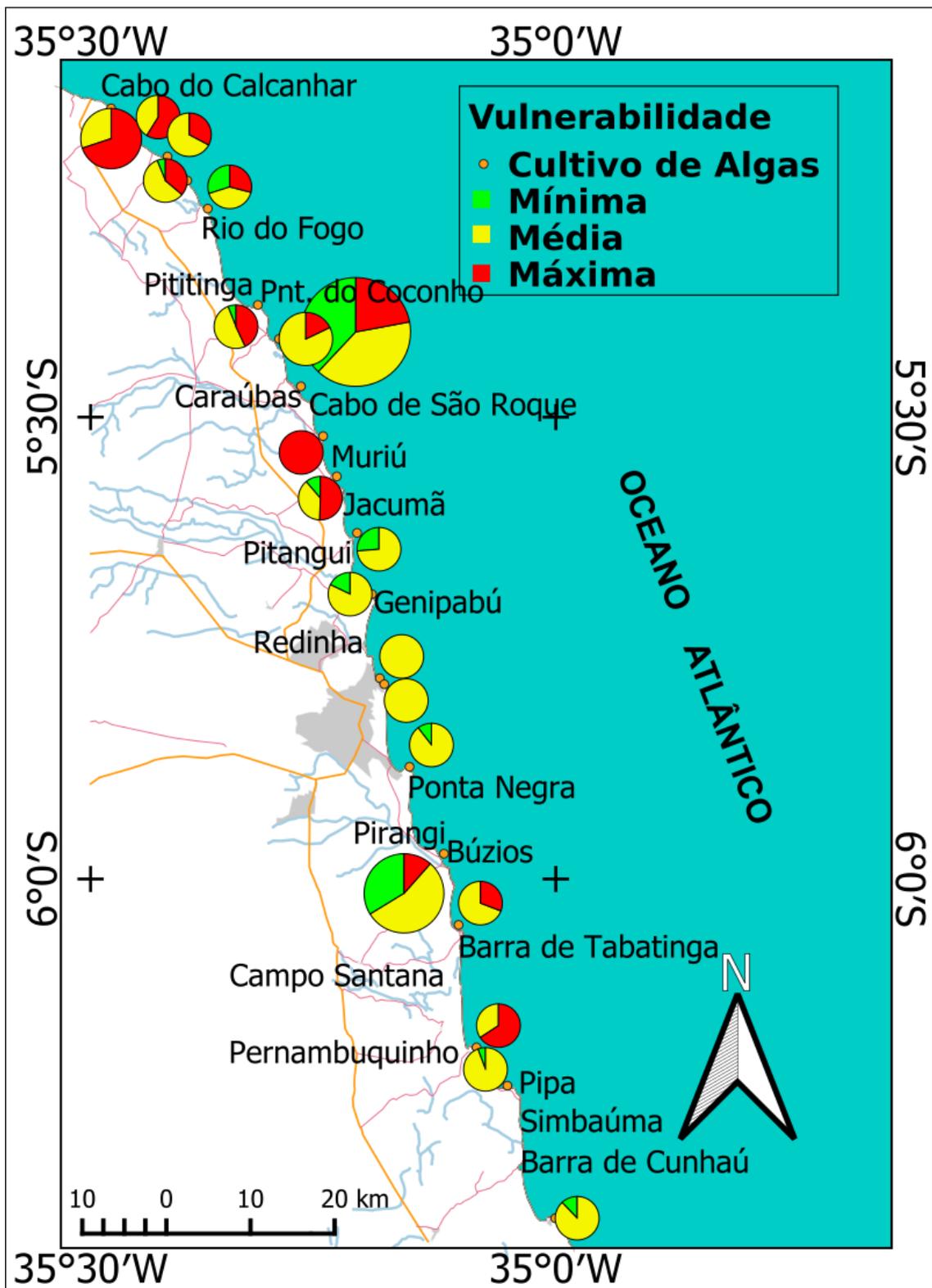


Figura 17 - Classificação das áreas costeiras pelo nível de vulnerabilidade socioeconômica e ambiental e a localização das áreas propícias ao cultivo.
 Fonte: Autora

A pesquisa, ao realizar a classificação cruzada das classes de vulnerabilidade socioeconômica e ambiental - introduzindo indicadores de vulnerabilidade como renda familiar mensal e áreas susceptíveis às mudanças ambientais com as classes de adequabilidade ao cultivo apresentadas por Sousa *et al.* (2012) estabeleceu um novo cenário de arranjo de potencial produtivo para as áreas propícias ao cultivo.

Neste novo cenário, Tibau do Sul, Maxaranguape, Quixaba, Touros, Muriú e Tibau do Sul, estão classificadas como de maior aptidão para o cultivo, isto porque apresentam-se como área de maior vulnerabilidade socioeconômica e ambiental, o que sugere, a partir dos critérios adotados, um maior potencial de engajamento das populações locais, visto que as mesmas não foram capazes de se inserirem no processo de desenvolvimento econômico regional, seja na indústria eólica, comércio, agricultura e mesmo na indústria do turismo que não incluiu suas populações pesqueiras em suas atividades.

Nesse contexto, uma maior vulnerabilidade socioeconômica e ambiental conforma-se em um fator que favorece à aptidão para o cultivo de uma determinada área, uma vez que a falta de outras oportunidades de emprego coloca a Algacultura como a alternativa viável.

Já na localidade de Pipa, no município de Tibau do Sul, sua vulnerabilidade socioeconômica e ambiental média, reflexo de seu maior nível de renda, advinda fortemente da atividade turística, tem-se na mesma uma variável restritiva ao engajamento das pessoas à atividade de cultivo de macroalgas, assim, sua vulnerabilidade socioeconômica e ambiental média reduz, neste cenário, a sua aptidão para o cultivo.

Verificou-se ainda que as localidades situadas ao norte da capital do estado, áreas compreendidas entre o município de Ceará-Mirim/RN até Touros/RN, além de reunir as melhores condições físicas e climáticas para o cultivo, apresentam uma baixa renda familiar e seus territórios vêm sofrendo significativas mudanças, configurando assim, uma área de alta vulnerabilidade socioeconômica e ambiental. Dessa forma, estas áreas mostram-se de interesse à adoção de práticas sustentáveis que conjuntamente possam gerar emprego e renda. Dessa forma apresenta-se como alternativa por ter a capacidade de promover um maior engajamento das comunidades, fomentando a esta, alternativa de trabalho e renda. Neste aspecto, nesta área tem-se cerca de 601.92 ha disponíveis com os melhores indicadores para a Algacultura.

A Tabela 6 apresenta as localidades com aptidão para o cultivo de macroalgas, a partir da classificação resultante da pesquisa, a qual parte das áreas em hectares qualificadas por suas condições de vulnerabilidade socioeconômica e ambiental. A

Tabela permite inferir que o modelo empreendido nesta tese serve para requalificar os níveis de potencialidades das áreas descritas por Sousa *et al.* (2012), ampliando a análise ao considerar determinantes socioeconômicos e ambientais locais.

Tabela 6 - Localidades de cultivos de macroalgas com as áreas em ha classificadas em níveis de vulnerabilidade socioeconômica e ambiental.

Distritos	Localidade	Aptidão da área (ha)			
		Baixa	Média	Alta	Total
Touros	Touros	0	64.89	150.57	215.46
Touros	Touros	0	25.65	36.63	62.28
Touros	Touros	0	45.72	22.32	68.04
Touros	Touros	2.34	22.05	13.86	38.25
Rio do Fogo	Rio do Fogo	38.61	52.83	37.44	128.88
Rio do Fogo	Rio do Fogo	8.55	73.44	62.1	144.09
Maxaranguape	Maxaranguape	0	156.33	33.93	190.26
Maxaranguape	Maxaranguape	147.78	155.07	85.59	388.44
Maxaranguape	Maxaranguape	0	0	18.09	18.09
Ceará-Mirim	Ceará-Mirim	15.84	54.18	71.28	141.3
Extremoz	Extremoz	9.9	27.72	0	47.16
Extremoz	Extremoz	16.47	75.96	0	92.43
Natal	Natal	0	1.35	0	1.35
Natal	Natal	0	16.56	0	16.56
Natal	Natal	5.67	48.51	0	54.18
Parnamirim	Parnamirim	81	131.31	27.54	284.76
Nísia Floresta	Nísia Floresta	0	33.93	15.12	49.05
Tibau do Sul	Tibau do Sul	0	14.31	27.45	41.76
Tibau do Sul	Tibau do Sul	7.11	118.89	0	126
Baia Formosa	Baia Formosa	14.4	104.85	0	119.25
	Total (ha)	347.67	1.223.55	601.92	2.227.59

Fonte: Elaboração própria

4.2 Estimativa do Potencial de Biomassa de Macroalgas

O cálculo do potencial estimado de produção anual de biomassa da alga considera as áreas apresentadas na Tabela 6, as quais estão classificadas como de baixa, média e alta aptidão e toma como referência o uso de um SMB, o qual apresenta uma estimativa de potencial produtivo de 87,6 t/ha/ano (ANDRADE NETO, 2015). Este potencial está dimensionado a partir de três cenários:

- i) Cenário I – Considera o aproveitamento das áreas classificadas como de alta aptidão, ou seja, compreende as áreas identificadas com indicadores físicos, socioeconômicos e ambientais que as tornam mais atrativas para cultivo de macroalgas. O mesmo totaliza uma área de 601,92 ha, onde 89% da mesma encontra-se concentrada na faixa territorial situada ao norte da Cidade de Natal/RN, entre os municípios de Ceará-Mirim/RN até Touros/RN. Faixa esta que já registra atividades de cultivo da espécie estudada, sendo, portanto, pelo seu conjunto de atrativos, considerada prioritária para o desenvolvimento da Alga-cultura na região de estudo. Para este cenário, conforme condicionantes apresentadas no item 3.3, tem-se uma estimativa de 52.728 t de biomassa fresca por ano, o que resulta em 5.272 t/ano de biomassa seca disponível ao mercado, caso se utilize 100% das áreas disponíveis. Esta estimativa alcança 26.364 t quando se aproveita 50% das áreas e se reduz a 10.545 t quando o cultivo se restringe a 20% das mesmas áreas.
- ii) O cenário II – pondera o aproveitamento do somatório das áreas classificadas como de alta e média aptidão. Compreende, dessa forma, 1.825,47 ha distribuídos ao longo de toda a costa do RN. Por este cenário é possível estimar, conforme condicionantes apresentadas no item 3.3, uma oferta anual de 159.911 t de biomassa fresca, o que resulta em 16.000 t/ano de biomassa seca a ser comercializada, no caso do aproveitamento de 100% da área classificada. Quando se aproveita 50% das áreas tem-se 79.955 t e quando o cultivo se reduz a 20% da mesma área se produz 31.981 t.

- iii) O cenário III – cenário menos provável, estima o emprego de todas as áreas com alguma vocação para o cultivo de macroalga, cerca de 2.227.59 ha - áreas de máxima, média e baixa aptidão. Neste cenário, conforme condicionantes apresentadas no item 3.3, a oferta anual de biomassa fresca alcançaria 195.136,88, o que corresponde a 19.513 t anuais de biomassa seca, em uma produção que faz uso de 100% da área classificada. Para o aproveitamento de 50% dessa mesma área obtém-se 97.568 t, reduzindo-se a 38.997 t quando a área de cultivo alcança apenas 20%.

Os valores estimados da produção anual de biomassa fresca e seca, a partir dos cenários apresentados, considerando diferentes níveis de ocupação das áreas classificadas na atividade de cultivo – 100%, 50% e 20% - estão sumarizados na Tabela 3. Importa destacar que a biomassa seca representa a maior parcela dos produtos comercializados pelas associações de Maricultoras do estado – AMBAP e AMAR. Este produto é negociado a valores de US\$ 50,00 por quilo de biomassa seca.

Os valores estimados nos diferentes cenários apresentados na Tabela 3 revelam o potencial inclusivo da estruturação da cadeia produtiva de macroalga na promoção da sustentabilidade, com a geração de emprego e renda. Essa afirmativa é apoiada pelo estudo de Santos Júnior *et al.* (2017) que aponta a viabilidade econômica da produção da biomassa seca, creditando a esta um acréscimo na renda média das mulheres que fazem o cultivo. O autor mostra que a produção e comercialização da biomassa seca pela Associação de Maricultoras de Rio do Fogo – AMAR, tem possibilitado um rendimento adicional de US\$ 75,00 mensal para cada maricultora. Esse incremento faz com que a renda per capita familiar aumente em 42,9%, ou seja, salta de US\$ 85,5 para US\$122,2 por mês, valor este 100% superior à renda familiar per capita do município de Rio do Fogo (SANTOS JÚNIOR *et al.*, 2017).

Nesse contexto, a prática de cultivo da macroalga da espécie *Gracilaria birdiae* juntamente com seu potencial produtivo assinalam a viabilidade da comercialização de seus produtos revestindo-a de significativa relevância social, econômica e ambiental para as famílias das Maricultoras. A mesma possibilita pensar a estruturação de um modelo de desenvolvimento regional orientado a reduzir desigualdades e promover a melhoria da qualidade de vida das comunidades costeiras.

4.3 Estimativa do Potencial de Bioprodutos

4.3.1 Bioetanol

A estimativa da produção anual de Bioetanol é feita utilizando o potencial produtivo estimado de biomassa nas áreas classificadas, apresentadas na Tabela 3. A extração de Bioetanol por tonelada de biomassa fresca faz uso dos valores referenciados por Andrade Neto (2015), os quais mostram que uma tonelada de biomassa fresca pode fornecer 10,8 l de etanol. Esta estimativa é realizada a partir dos três cenários descritos no item 4.2 cujos resultados estão assim apresentados:

- i) O Cenário I - Neste cenário, tem-se uma estimativa de 569.464 litros por ano de Bioetanol caso se cultive 100% das áreas disponíveis. Alcançando 284.732 litros quando do aproveitamento de 50% das áreas e assume o valor de 113.892 litros quando o cultivo se resume a 20% das áreas definidas neste cenário.
- ii) O Cenário II - Este cenário permite oferecer 1.727.040 litros de Bioetanol caso se utilize 100% das áreas disponíveis. Esta estimativa alcança 863.515 litros quando se aproveita 50% das áreas e se reduz a 345.404 litros quando o cultivo se restringe a 20% das mesmas áreas.
- iii) O Cenário III – Para este cenário a oferta anual de Bioetanol alcança 2.107.478 litros em uma produção que faz uso de 100% das áreas classificadas no cenário. Para o aproveitamento de 50% dessa mesma área obtém-se 1.053.734 litros, reduzindo-se a 421.175 litros quando a área de cultivo alcança apenas 20%.

4.3.2 Biofertilizante

A produção anual estimada de Biofertilizante considera que sua extração é feita a um rendimento de 50% a partir da biomassa fresca (ANDRADE *et al.*, 2020) conforme condicionantes apresentadas no item 3.3, sendo as estimativas realizadas a partir dos três cenários descritos no item 4.2, para os quais os resultados estão assim apresentados:

- i) Cenário I - Tem-se neste cenário uma estimativa de 26.364 litros de Biofertilizante por ano, caso se cultive 100% das áreas disponíveis. Alcançando 13.182 litros quando do aproveitamento de 50% das áreas e se assume o valor de 5.272 litros quando o cultivo se resume a 20% das áreas definidas neste cenário.

- ii) O Cenário II - Este cenário permite estimar uma produção de 79.955 litros de Biofertilizante caso se utilize 100% de suas áreas. Esta estimativa alcança 39.977 litros quando se aproveita 50% das áreas e se reduz a 15.990 litros quando o cultivo se restringe a 20% das mesmas áreas.

- iii) O Cenário III – A oferta anual de Biofertilizante estimada para este cenário totaliza 97.568 litros, em uma produção realizada em 100% das áreas classificadas. Caso seja aproveitada 50% dessa mesma área obtém-se 48.784 litros, sendo a oferta de Biofertilizante reduzida a 19.498 litros quando a área de cultivo alcança apenas 20%.

4.3.3 Ágar

A produção estimada de Ágar é obtida considerando dois percentuais de rendimentos (22% e 47%) conforme descrito no item 3.4.3 (BEZERRA; SORIANO, 2010; FERREIRA, 2015), sendo a mesma também especificada de acordo com os três cenários delineados no item 4.2.

A Tabela 7 apresenta a estimativa do potencial produtivo da biomassa da macroalga da espécie *Gracilaria birdiae* a partir das áreas identificadas como adequadas à produção, no litoral do estado do RN, considerando os aspectos socioeconômicos e ambiental para a produção.

Tabela 7 - Estimativa do Potencial de Produção de Biomassa e Bioprodutos - Bioetanol - Biofertilizante e Ágar - a partir do Cultivo de Macroalgas da espécie *Gracilaria birdiae*.

	Cenário 1 *			Cenário 2**			Cenário 3***			
	20%	50%	100%	20%	50%	100%	20%	50%	100%	
Área (ha)	120,38	300,96	601,92	365,09	912,73	1.825,47	445,18	1.113,79	2.227,59	
Biomassa fresca (t/ano)	10.545	26.364	52.728	31.981	79.955	159.911	38.997	97.568	195.136	
Biomassa seca (t/ano)	1.054	2.636	5.272	3.198	7.995	15.991	3.899	9.756	19.513	
Bioetanol (m³/ano)	113,89	284,73	569,46	345,40	863,51	1727,04	421,17	1053,73	2107,47	
Biofertilizante (l/ano)	5.272	13.182	26.364	15.990	39.977	79.955	19.498	48.784	97.568	
Ágar (t/ano)	22%	2.320	5.800	11.600	7.036	17.590	35.180	8.579	21.464	42.930
	47%	4.956	12.391	24.782	15.031	37.578	75.158	18.328	45.856	91.714

Legenda: (*) Áreas muito adequadas; (**) Muito adequadas e áreas adequadas; (***) Área total

Fonte: Elaboração própria

No cenário I, com 22% de rendimento, quando cultivado em 100% das áreas classificadas, extrai-se 11.600 t de ágar/ano. Para 50% das áreas, esse valor chega a 5.800 t/ano, diminuindo para 2.320 t quando o cultivo é realizado em 20% das áreas definidas neste cenário. Com 47% de rendimento, 24.782 t de ágar/ano são obtidas se 100% das áreas disponíveis forem usadas. Isso equivale a 12.391 t quando 50% das áreas são utilizadas, diminuindo para 4.956 t quando o cultivo é realizado em apenas 20% da área total contabilizada nesse cenário.

Em relação ao cenário II, para 22% de rendimento, utilizando 100% das áreas definidas neste cenário, é possível obter 35.180 t de Ágar, diminuindo para 17.590 t quando 50% das áreas são utilizadas, atingindo apenas 7.036 t quando o cultivo é restrito a 20% das mesmas áreas. Para um rendimento de 47%, estima-se 75.158 t de ágar/ano quando o cultivo é realizado em 100% das áreas classificadas nesse cenário. Ao usar 50% dessas mesmas áreas, são obtidas 37.578 t/ano, diminuindo para 15.031 t/ano quando o cultivo ocupa 20% das áreas.

E, finalmente, no cenário III, com 22% de produtividade, o cultivo de algas em 100% das áreas classificadas resulta em 42.930 t de ágar/ano. Se 50% dessa mesma área for utilizada, serão obtidas 21.464 t de ágar/ano, diminuindo para 8.579 t/ano, utilizando apenas 20% das áreas definidas neste cenário. Para um rendimento de 47%, esse cenário estima 91.714 t de ágar/ano se 100% das áreas classificadas forem cultivadas, diminuindo para 45.856 t de ágar/ano quando 50% das áreas são usadas e atingindo 18.328 t de ágar/ano quando o cultivo ocorre em apenas 20% das áreas.

O potencial produtivo dos produtos da Algacultura, apresentado nos cenários descritos no item 4.3, revela que essa atividade apresenta significativa relevância econômica, social e ambiental para as comunidades costeiras, reduzindo as desigualdades e promovendo a melhoria da qualidade de vida das mesmas.

CONCLUSÕES

Os desafios impostos pelas transformações socioeconômicas e ambientais, incluído nestas a urgente necessidade de frear o denominado aquecimento global, amplia o espaço favorável ao desenvolvimento de novos mercados e regiões propícias ao cultivo, processamento e comercialização das algas marinhas e seus bioprodutos.

Nesse contexto, as algas marinhas expandem sua importância como recurso natural promissor na oferta de bioprodutos - biocombustíveis, compostos bioativos, biotecnologia, entre outras -, onde ganha destaque o seu potencial aproveitamento industrial, os quais oferecem diversas aplicações nos mais variados processos. Ganha destaque, nesse âmbito, a indústria alimentícia que emprega 80% da produção mundial de algas marinhas diretamente na alimentação humana. Inúmeras outras aplicações utilizam as algas marinhas como insumo produtivo, a exemplo da agricultura onde estas entram na formulação de ração e biofertilizantes. Destaca-se também o desenvolvimento de pesquisas e processos que apontam para o elevado potencial dessa cultura em se estabelecer como fonte de energia renovável, na produção de biocombustíveis.

As novas aplicações comerciais dadas às algas marinhas vêm somar-se como alternativa de provisão das crescentes demandas de energia e produtos menos emissores de gases de efeito estufa, estabelecidas pela tentativa de firmar um novo padrão de desenvolvimento que seja sustentável social, econômico e ambiental.

Destarte, o desenvolvimento de novos produtos derivados das algas marinhas, com proeminência as macroalgas, resultará das opções sociopolíticas e econômicas, sendo condicionado por limitantes de caráter natural, bem como pelos determinantes impostos pela disputa e interesses inerentes ao modelo global de produção de mercadorias. Assim, o desenvolvimento de novos produtos com elevado valor agregado como alimentos funcionais, cosmecêuticos, nutracêuticos e biocombustíveis conformam-se em um mercado promissor, em rota de crescimento.

Nesse enquadramento, o debate atinente à estimativa do potencial de produção de bioprodutos a partir da biomassa de macroalgas, nessa tese, encontra-se inserido em um ambiente de análise que contempla as dimensões técnica, econômica e socioambiental, e, para tanto, toma como espaço de estudo a área circunscrita à costa oriental do estado do Rio Grande do Norte.

O espaço necessário às análises realizadas, encontra-se demarcado na tese pela caracterização dos referenciais que conformam o atual mercado de cultivo e oferta de produtos derivados das macroalgas no mundo e, em particular, suas repercussões no Brasil. Esquadrinha também o processo de evolução do uso dos recursos das macroalgas e os correspondentes procedimentos de adoção de distintas tecnologias de cultivo e extração de produtos que culminaram no estabelecimento de uma regularidade de sua oferta no mercado.

As macroalgas estão secularmente presentes no cotidiano humano, na atualidade vêm adicionando interesse como um recurso natural promissor, para o qual registra-se um mercado bem estabelecido na Ásia e em forte expansão na Europa onde seus produtos derivados mostram-se de elevado valor agregado. No Brasil, esse mercado manifesta-se incipiente, apesar de apresentar um atrativo potencial de cultivo e produção. O país reúne inúmeros fatores favoráveis ao desenvolvimento dessa atividade. Dentre estes disponibiliza-se uma extensa costa que se estende por mais de 7.400 km, onde verifica-se a presença de distintas espécies nativas de macroalgas, sendo na costa da região Nordeste onde as mesmas se mostram mais diversificadas e abundantes. A exuberância de macroalgas nesta região está associada principalmente às condições favoráveis de temperatura, salinidade e luz, além da presença de substratos rochosos e recifes, adequados para o estabelecimento e garantia de seu crescimento.

O Rio Grande do Norte, em que pese sua diminuta expressividade econômica no cenário nacional, apresenta-se abundante em recursos energéticos naturais como petróleo, gás natural, energia solar e eólica, bem como em recursos marinhos como pesca e cultivo de camarão. Sua posição geográfica, clima, relevo e batimetria costeira lhe caracteriza com uma próspera região para o cultivo de macroalgas. Neste sentido, revela-se como uma atividade que pode contribuir com o desenvolvimento regional, geração emprego e renda para as populações que ocupam às áreas costeiras do estado, territórios estes que apresentam baixo nível de desenvolvimento econômico e IDH.

O estudo, por meio da integração de dados espaciais de caráter socioeconômico e ambiental acrescido dos fatores físicos ideais ao cultivo, realizado no litoral Oriental do estado do Rio Grande do Norte, possibilitou a identificação de uma área de 2.227,59 ha, com potencial produtivo de 195.136,88 toneladas de algas frescas por ano, biomassa esta que pode ofertar 2.107,47 m³ de bioetanol/ano, 97.568 litros de biofertilizante/ano e 91.714 t ágar/ano. Este potencial resulta de cenários de expansão de cultivo estruturados na pesquisa, os quais, através dos resultados obtidos classificam as áreas em alta, média e baixa aptidão para Algacultura, abonando, dessa forma, os argumentos

favoráveis ao desenvolvimento da Algacultura no estado do Rio Grande do Norte, incentivando sua cadeia produtiva de bioprodutos possíveis de serem obtidos nesta atividade.

As áreas de alta aptidão são aquelas que registram mudanças ambientais mais intensas, fundamentalmente na faixa costeira, de forma mais evidente na região das dunas e nas zonas de praias. Nessas áreas, além do intenso processo erosivo da faixa de praia, as dunas foram ocupadas por grandes projetos de aproveitamento eólico, apontando nesses espaços, uma ocorrência acentuada de mudanças ambientais. Tais áreas encontram-se ao norte da capital do Estado, entre os municípios de Ceará-Mirim e Touros, contando com 601,92 ha disponíveis com as melhores condições físicas e climáticas para a Algacultura. Neste espaço também revela-se uma elevada vulnerabilidade socioeconômica onde a maioria das localidades investigadas se enquadraram na faixa de renda familiar mensal inferior a um salário-mínimo nacional. Por consequência, nestas áreas, encontra-se uma maior oferta de mão de obra disposta a atuar na Algacultura. Fato que adiciona oportunidades para o cultivo, uma vez que há um engajamento maior da população que não foi inserida no processo de desenvolvimento econômico regional, seja na indústria eólica, comércio, agricultura ou turismo.

As áreas de média aptidão totalizam 1.223,55 ha para o cultivo. Apresentam boas condições para Algacultura, baixos indicadores socioeconômicos como IDH e renda familiar. Fazendo com que a disponibilidade de mão obra presente menor intensidade que as áreas de alta aptidão. Nestas áreas, encontra-se a localidade de Pipa que devido ao seu maior nível de renda advinda do turismo, torna-se uma variável restritiva ao engajamento das pessoas à atividade de cultivo.

Nas áreas de baixa aptidão identificadas - 402,12 ha - as atividades econômicas como o turismo, hospedagem, comércio, bares e restaurantes empregam com maior intensidade a população local. Essas características apontam que mesmo tendo uma vocação para produção de alga, não há população para o cultivo, a qual se volta prioritariamente para as atividades econômicas predominantes no território. Somando-se as áreas de alta e média aptidão tem-se 1.825,17 ha disponíveis para a Algacultura no litoral Oriental do estado do Rio Grande do Norte, fato que indica que mais de 81, 93% das áreas identificadas nesta pesquisa para o litoral Oriental são aptas ao cultivo.

Como resultado da ausência de uma política pública direcionada ao desenvolvimento e gestão da aquicultura no Brasil, constata-se que o potencial produtivo desse setor na costa brasileira segue negligenciado. Atividades como a Algacultura

permanece sem ações efetivas de fomento ao seu desenvolvimento, por meio de políticas públicas de incentivo a esta atividade, que apresenta potencial de promoção do desenvolvimento sustentável na costa brasileira. Ao ponderar o emprego da Algacultura em toda costa brasileira, com destaque na costa nordestina, considerando-se os fatores naturais favoráveis presentes ao longo destas, a exemplo da extensa barreira de recifes costeiros margeando a costa do Nordeste desde o estado do Rio Grande do Norte até Sergipe e fazendo uso das espécies nativas de cada região, tal atividade tem um elevado potencial de oportunizar ao país uma alternativa sustentável de desenvolvimento regional, com custos de implementação inferiores àqueles demandados na implantação da carcinicultura incentivada fortemente pelo Estado, por exemplo. Vale ressaltar que a Algacultura pode ser desenvolvida pelos indivíduos que não possuem terra para uso em prol de sua subsistência e tal cultivo pode estar associado a outros cultivos de animais como peixes em gaiolas e moluscos, promovendo a segurança alimentar destas comunidades costeiras.

Soma-se a Algacultura os benefícios ambientais trazidos por esta atividade em consonância com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) nos esforços de assegurar os direitos humanos, erradicar a pobreza, reduzir a desigualdade e a injustiça, alcançar a igualdade de gênero e o empoderamento de mulheres e meninas e atuar no enfrentamento das mudanças climáticas.

As algas, portanto, conformam-se em um importante recurso renovável para produção de combustíveis baseados nos princípios da bioenergia e da sustentabilidade, agregando diversas vantagens ambientais em sua produção, bem como na mitigação dos Gases de Efeito Estufa, por meio do processamento sustentável da biomassa em biorrefinarias, gerando o mínimo de resíduos, uma vez que o aproveitamento da biomassa nesse processo é completo.

No campo socioeconômico, tem-se a geração de emprego e renda e a fixação dessas populações em suas regiões. Na esfera ambiental, pode-se destacar a preservação das espécies de algas nativas em seus bancos naturais que dão suporte alimentar, servem de abrigo e proteção a outras espécies marinhas, atraindo assim outras espécies economicamente importantes para a pesca e proporcionando segurança alimentar a estas comunidades costeiras. Há também a possibilidade de implantação de um cultivo multitrófico que permite o cultivo consorciado de outras espécies como os moluscos, favorecendo assim a diversificação dos produtos produzidos e comercializados pelas comunidades costeiras, gerando um incremento na renda familiar e a produção de mais alimentos advindos das atividades da aquicultura marinha.

Como desdobramento da pesquisa desenvolvida nesta tese, pode-se expandir as análises feitas ao litoral Setentrional do estado com seus 244 km de extensão que representam 59% de toda a costa do Rio Grande do Norte, com predominância de praias arenosas e clima tropical quente e seco ou semiárido. Considerando-se que esta faixa litorânea também possui características físicas, socioeconômicas e ambientais propícias ao desenvolvimento da Algacultura, pode-se inferir que os ganhos advindos dessa atividade em todo o estado do Rio Grande do Norte são positivos.

Outros estudos que se somam aos objetivos desta tese podem ser orientados a investigar as contribuições do aproveitamento do potencial do cultivo de algas na costa Potiguar ao alcance dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, com evidência na erradicação da pobreza, redução da desigualdade e empoderamento feminino, uma vez que a prática desta atividade no estado vem dando vozes e oportunidades às mulheres que atuam no cultivo de algas.

REFERÊNCIAS

ABUD, A. K. D. S.; SILVA, C. E. D. F. Bioethanol in Brazil: Status, Challenges and Perspectives to Improve the Production. **Bioethanol Production from Food Crops**. p.417–443, 2019. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-813766-6/00021-7>>. .

ADENIYI, O. M.; AZIMOV, U.; BURLUKA, A. Algae biofuel: Current status and future applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, n. August 2017, p. 316–335, 2018. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.067>>. .

ALGAEBASE. Algaebase: Listing the World's Algae. Disponível em: <<https://www.algaebase.org/>>. Acesso em: 28/9/2020a.

ALGAEBASE. *Gracilaria birdiae* E.M.Plastino & E.C.Oliveira 2002. Disponível em: <https://www.algaebase.org/search/species/detail/?species_id=62160&sk=0&from=results>. Acesso em: 29/9/2020b.

ALGASBRAS. Algasbras Biorrefinaria. Disponível em: <<http://www.carragenabrasil.com.br/ba/institucional/quem-somos/>>. Acesso em: 24/4/2021.

AMANCIO, C. E. **Precipitação de CaCO₃ em algas marinhas calcárias e balanço de CO₂ atmosférico: os depósitos calcários marinhos podem atuar como reservas planetárias de carbono?**, 2007. Universidade de São Paulo, USP. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/41132/tde-06112007-144852/publico/Carlos_Eduardo_Amancio.pdf>. Acesso em: 10/8/2020.

ANDRADE, H. M. M. DE Q.; ROSA, L. P.; DE SOUZA, F. E. S.; et al. Seaweed production potential in the Brazilian Northeast: A study on the eastern coast of the State of Rio Grande do Norte, RN, Brazil. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 3, 2020.

ANDRADE NETO, J. C. DE. **Potencial produção de etanol a partir da macroalga *Gracilaria birdiae* cultivada**, 2015. UFRN. Disponível em: <https://sigaa.ufrn.br/sigaa/public/programa/defesas.jsf?lc=pt_BR&id=85>. .

ARAUJO, G. S.; RODRIGUES, J. A. G. MARICULTURA DA ALGA MARINHA VERMELHA *Gracilaria birdiae* EM ICAPUÍ, CEARÁ. **Arq. Ciên. Mar**, v. 44 (1):, p. 62–68, 2011. Disponível em: <<https://labomar.ufc.br/wp-content/uploads/2017/02/acm-2011-44-1-09.pdf>>. Acesso em: 24/11/2020.

ARAUJO, J. M. H. **Algas marinhas como bioestimulantes no crescimento inicial de espécies florestais da Caatinga**, 2017. UFRN. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/23932/1/AlgasMarinhasBioestimulantes_Araujo_2017.pdf>. .

ASOKAN, A.; ANITHA, J. Change detection techniques for remote sensing applications: a survey. **Earth Science Informatics**, v. 12, n. 2, p. 143–160, 2019. Earth Science Informatics. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12145-019-00380-5>>. .

AVISE, J. C. **Molecular Markers, Natural History and Evolution**. Boston, MA: Springer US, 1994.

AYRES-OSTROCK, L. M. **Estudos populacionais em Gracilaria birdiae e G . caudata (Gracilariales , Rhodophyta): aspectos fenológicos , fisiológicos e moleculares ” “ Population studies in Gracilaria birdiae and G . caudata (Gracilariales , Rhodophyta): phenological , physiol**, 2014. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/41132/tde-19032015-143740/publico/Ligia_Ostrock_CORRIG_SIMPL.pdf>. .

BAGHEL, R. S.; REDDY, C. R. K.; JHA, B. Characterization of agarophytic seaweeds from the biorefinery context. **Bioresource Technology**, v. 159, p. 280–285, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.083>>. .

BALINA, K.; ROMAGNOLI, F.; BLUMBERGA, D. Seaweed biorefinery concept for sustainable use of marine resources. **Energy Procedia**, v. 128, p. 504–511, 2017. Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217339115>>. Acesso em: 3/10/2019.

BANAI-KASHANI, R. A new method for site suitability analysis: The analytic hierarchy process. **Environmental Management**, v. 13, n. 6, p. 685–693, 1989. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF01868308>>. .

BEZERRA, A. D. F. **Cultivo de algas marinhas como desenvolvimento de comunidades costeiras**, 2008. UFRN. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/18189/1/AntoninoFB.pdf>>. .

BEZERRA, A. F.; SORIANO, E. M. Cultivation of the red seaweed *Gracilaria birdiae* (*Gracilariales*, *Rhodophyta*) in tropical waters of northeast Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, n. 12, p. 1813–1817, 2010. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.07.016>>. .

BIXLER, H. J.; PORSE, H. A decade of change in the seaweed hydrocolloids industry. **Journal of Applied Phycology**, v. 23, n. 3, p. 321–335, 2011. Springer. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-010-9529-3>>. Acesso em: 28/11/2020.

BRASIL. **CÂMARA DOS DEPUTADOS Centro de Documentação e Informação**. 2004.

BRASIL. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios**. 2012.

BRASIL. Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio do Brasil - Comex Stat - Exportação e Importação Geral. Disponível em: <<http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral/30668>>. Acesso em: 23/3/2021.

BRASIL, B. C. DO. Conversor de Moedas. Disponível em:
<<https://www.bcb.gov.br/conversao>>. Acesso em: 30/4/2021.

BRENNAN, W. Cultivating Change: Women's Involvement in a Brazilian Seaweed Collective. **Anthropology Honors Projects**, 2013. Disponível em:
<https://digitalcommons.maclester.edu/anth_honors/19>. Acesso em: 28/11/2020.

BROCH, O. J.; SKJERMO, J.; HANDÅ, A. **Potensialet for storskala dyrking av makroalger i Møre og Romsdal**. 2016.
BRUGERE, C.; WILLIAMS, M. **Women in aquaculture - GAF**. 2017.

BUSCHMANN, A. H.; CORREA, J. A.; WESTERMEIER, R.; HERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, M. D. C.; NORAMBUENA, R. Red algal farming in Chile: a review. **Aquaculture**, v. 194, n. 3–4, p. 203–220, 2001. Disponível em:
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0044848600005184>>. .

CARDOZO, K. H. M.; GUARATINI, T.; BARROS, M. P.; et al. Metabolites from algae with economical impact. **Comparative Biochemistry and Physiology - C Toxicology and Pharmacology**, v. 146, n. 1-2 SPEC. ISS., p. 60–78, 2007.

CARDOZO, K. H. M.; MARQUES, L. G.; CARVALHO, V. M.; et al. Analyses of photoprotective compounds in red algae from the Brazilian coast. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 21, n. 2, p. 202–208, 2011. Sociedade Brasileira de Farmacognosia. Disponível em:
<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-695X2011000200002&lng=en&nrm=iso&tlng=en>. Acesso em: 20/10/2020.

CARNEIRO, M. A. A.; MARINHO-SORIANO, E.; PLASTINO, E. M. Phenology of an agarophyte *Gracilaria birdiae* Plastino and E.C. Oliveira (*Gracilariales*, *Rhodophyta*) in Northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 21, n. 2, p. 317–322, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-695X2011000200018&lng=en&nrm=iso&tlng=en>. .

CARNEIRO, M. A. DO A. **Fenologia, aspectos ecofisiológicos e seleção de linhagens em cultivos no mar de *Gracilaria birdae* (*Rhodophyta*, *Gracilariales*) no estado do Rio Grande do Norte, Brasil.**, 2011. USP.

CARVALHO, V.; SANTOS, J.; MALDONADO, F. Caracterización de cambios e influencia climática sobre la cobertura vegetal en el semiárido brasileño mediante Análisis de Componentes Principales (ACP). **Revista de teledetección: Revista de la Asociación Española de Teledetección**, , n. 13, p. 3, 2000.

CASTRO, G. M. C. DE; BENEVIDES, N. M. B.; CABRAL, M. C.; et al. Optimized acid hydrolysis of the polysaccharides from the seaweed *Solieria filiformis* (Kützting) P.W. Gabrielson for bioethanol production. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, v. 39, n. 4, p. 423, 2017. Disponível em:
<<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciBiolSci/article/view/37227>>. .

CHACON, M.; CARRILLO, O.; ARGOTTY, F.; et al. **El estado del monitoreo forestal en Latinoamérica y el Caribe : tipos de iniciativas y uso de tecnologías**. 2016.

CHAPMAN, V. J.; CHAPMAN, D. J. **Seaweeds and their Uses**. Dordrecht: Springer

Netherlands, 1980.

CHARETTE, M.; SMITH, W. The Volume of Earth's Ocean. **Oceanography**, v. 23, n. 2, p. 112–114, 2010. Disponível em: <<https://tos.org/oceanography/article/the-volume-of-earths-ocean>>. .

CHÁVEZ-CROOKER, P.; OBREQUE-CONTRERAS, J. Bioremediation of aquaculture wastes. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 21, n. 3, p. 313–317, 2010. Elsevier Current Trends. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958166910000637>>. Acesso em: 23/11/2020.

CHEN, H.; ZHOU, D.; LUO, G.; ZHANG, S.; CHEN, J. Macroalgae for biofuels production: Progress and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2015.

CHOPIN, T.; BUSCHMANN, A. H.; HALLING, C.; et al. INTEGRATING SEAWEEDS INTO MARINE AQUACULTURE SYSTEMS: A KEY TOWARD SUSTAINABILITY. **Journal of Phycology**, v. 37, n. 6, p. 975–986, 2001. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1529-8817.2001.01137.x>>. .

COSTA, D. P. DA. Crittogame brasileira , a review of Giuseppe Raddi bryophyte collections in the state of Rio de Janeiro. **Journal of Bryology**, v. 31, n. 4, p. 222–233, 2009. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/037366809X12495600997402>>. Acesso em: 4/9/2020.

COSTA, E. DA S. **Algas Gracilarióides (Gracilariaceae, Rhodophyta) na costa brasileira: Uma abordagem morfológica e molecular**, 2013. USP. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/41132/tde-22072013-093146/publico/Emmanuelle_Costa_CORRIG.pdf>. Acesso em: 31/8/2020.

COURA, C. O.; DE ARAÚJO, I. W. F.; VANDERLEI, E. S. O.; et al. Antinociceptive and Anti-Inflammatory Activities of Sulphated Polysaccharides from the Red Seaweed *Gracilaria cornea*. **Basic and Clinical Pharmacology and Toxicology**, v. 110, n. 4, p. 335–341, 2012.

CRAIGIE, J. S.; SHACKLOCK, P. . **Culture of Irish moss**. 2 end Ed. ed. The Canadian Institute for Research on Regional Development: Moncton, NB, Canada, 1995., 1995.

CURRIE, M. E. The Growing Sustainable Seaweed Industry: A Comparison of Australian State Governance Directing Current and Future Seaweed Cultivation. Disponível em: <http://digitalcollections.sit.edu/isp_collection/2956>. Acesso em: 23/11/2020.

DIETER MUEHE. Ceará. **Die Guaporé-Expedition (1933–1935)**. p.52–63, 2015. Köln: Böhlau Verlag. Disponível em: <<https://www.vr-elibrary.de/doi/10.7788/9783412218591-007>>. .

DILLEHAY, T. D.; RAMÍREZ, C.; PINO, M.; et al. Monte Verde: Seaweed, food, medicine, and the peopling of South America. **Science**, v. 320, n. 5877, p. 784–786, 2008. Science. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18467586/>>. Acesso

em: 10/9/2020.

DURAIRATNAM, M. Exploitation and management of seaweed resources in northeast Brazil. **Journal of the Marine Biological Association of India**, v. 31, n. 1–2, p. 117–121, 1989.

EASTMAN, J. R. IDRISI Selva Tutorial. Manual Version 17. **Idrisi Production, Clark Labs-Clark University**, v. 45, n. January, p. 51–63, 2012.

EMBRAPA. Landsat - Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/landsat>>. Acesso em: 26/5/2021.

EPAGRI. Pesquisas da EPAGRI visam tornar a macroalga nova alternativa de renda dos cultivos marinhos em SC. Disponível em: <<https://www.epagri.sc.gov.br/index.php/2020/07/07/pesquisas-da-epagri-visam-tornar-a-macroalga-nova-alternativa-de-renda-dos-cultivos-marinhos-em-sc/>>. .

FAO. **El estado mundial de la pesca y la acuicultura - Contribución a la seguridad alimentaria y la nutrición para todos**. 2016.

FAO. **El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020**. FAO, 2020.

FÉRAL, J.-P. How useful are the genetic markers in attempts to understand and manage marine biodiversity? **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, v. 268, p. 121–145, 2002. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/jembe>. Acesso em: 20/9/2020.

FERDOUSE, F.; LOVSTAD HOLDT, S.; SMITH, R.; MURÚA, P.; YANG, Z. **The global status of seaweed production, trade and utilization**. 2018.

FERNAND, F.; ISRAEL, A.; SKJERMO, J.; et al. Offshore macroalgae biomass for bioenergy production: Environmental aspects, technological achievements and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2017.

FERREIRA, A. B. G. **MACROALGAS MARINHAS : CONHECIMENTOS**, 2020. UFRN. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/29977/1/Macroalgasmarinhasconhecimentos_Ferreira_2020.pdf>. .

FERREIRA, D. M. **Extração de agar de algas vermelhas do género Gracilaria**, 2015. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Disponível em: <<https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/12228/1/Diana-Mafalda-Ferreira.pdf>>. .

FIGUEIREDO, M. A participação da mulher na organização socioespacial de comunidades pesqueiras: Um estudo de caso na Reserva extrativista Baía do Iguape. **Revista Latino-americana de Geografia e Genero**, v. 4, n. 2, p. 77–85, 2013. Disponível em: <http://www.revistas2.uepg.br/index.php/rlagg/article/view/3288/pdf_75>. .

FREDDI, A.; AGUILAR-MANJARREZ, J. **Small-scale seaweed farming in North East Brazil. TCP/BRA/0065 FAO Aquaculture Newsletter 34 - December 2005**. 2003.

FRESHWATER, D. W.; FREDERICQ, S.; BUTLER, B. S.; HOMMERSAND, M. H.; CHASE, M. W. A gene phylogeny of the red algae (Rhodophyta) based on plastid rbcL. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 91, n. 15, p. 7281–7285, 1994.

FUJII, M. T. **Guia ilustrado de identificação e utilização de algas marinhas bentônicas do Estado de São Paulo**. São Paulo, 2016.

GARCÍA-POZA, S.; LEANDRO, A.; COTAS, C.; et al. The Evolution Road of Seaweed Aquaculture: Cultivation Technologies and the Industry 4.0. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 18, p. 6528, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1660-4601/17/18/6528>>. .

GAURAV, N.; SIVASANKARI, S.; KIRAN, G.; NINAWA, A.; SELVIN, J. Utilization of bioresources for sustainable biofuels: A Review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, p. 205–214, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117300801>>. .

GELLI, V. C. **Desenvolvimento ordenado e potencial da produção da macroalga *Kappaphycus alvarezii* no estado de São Paulo para extração de biofertilizante.**, 2019. UNICAMP. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/334863>>. .

GELLI, V. C.; PATINO, M. T. O.; ROCHA, J. V.; et al. Production of the kappaphycus alvarezii extract as a leaf biofertilizer: Technical and economic analysis for the north coast of São paulo-brazil*. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 46, n. 2, p. 1–12, 2020.

GHADIRYANFAR, M.; ROSENTRATER, K. A.; KEYHANI, A.; OMID, M. A review of macroalgae production, with potential applications in biofuels and bioenergy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 473–481, 2016.

GLENN, E. P.; MOORE, D.; BROWN, J. J.; et al. A sustainable culture system for *Gracilaria parvispora*/Rhodophyta using sporelings, reef growout and floating cages in Hawaii. **Aquaculture**, v. 165, p. 221–232, 1998.

GOH, C. S.; LEE, K. T. A visionary and conceptual macroalgae-based third-generation bioethanol (TGB) biorefinery in Sabah, Malaysia as an underlay for renewable and sustainable development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 2, p. 842–848, 2010.

GRAHAM, L.E; WILCOX, L. . **Algae**. 2º ed. New Jersey: Pearson, 2009.

GRANADA, L.; SOUSA, N.; LOPES, S.; LEMOS, M. F. L. Is integrated multitrophic aquaculture the solution to the sectors' major challenges? - a review. **Reviews in Aquaculture**, v. 8, n. 3, p. 283–300, 2016. Wiley-Blackwell. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/raq.12093>>. Acesso em: 23/11/2020.

GRESSLER, V.; YOKOYA, N. S.; FUJII, M. T.; et al. Lipid, fatty acid, protein, amino acid and ash contents in four Brazilian red algae species. **Food Chemistry**, v. 120, n. 2, p. 585–590, 2010.

GUILLEMIN, M. L.; VALERO, M.; FAUGERON, S.; NELSON, W.; DESTOMBE, C. Tracing the trans-pacific evolutionary history of a domesticated seaweed (*Gracilaria*

chilensis) with archaeological and genetic data. **PLoS ONE**, v. 9, n. 12, p. 1–17, 2014.

GUIRY, M. .; NORRIS, J. N.; FREDERICQ, S.; GURGEL, C. F. D. *Crassiphycus* Guiry, Gurgel, J.N.Norris & Fredericq, gen. nov., a replacement name for *Crassa* Gurgel, J.N.Norris & Fredericq, nom. inval. (Gracilariaceae, Rhodophyta). **Notulae algarum**, v. 82, n. 52, p. 5, 2018. Disponível em: <<https://img.algaebase.org/pdf/8CCB0C041d91e14DB1YO4072D340/62400.pdf>>. .

GURGEL, C. F. D.; NORRIS, J. N.; SCHMIDT, W. E.; LE, H. N.; FREDERICQ, S. Systematics of the Gracilariales (Rhodophyta) including new subfamilies, tribes, subgenera, and two new genera, *Agarophyton* gen. nov. and *Crassa* gen. nov. **Phytotaxa**, v. 374, n. 1, p. 1, 2018. Disponível em: <<https://biotaxa.org/Phytotaxa/article/view/phytotaxa.374.1.1>>. .

HAFTING, J. T.; CRAIGIE, J. S.; STENGEL, D. B.; et al. Prospects and challenges for industrial production of seaweed bioactives. (M. Graham, Org.) **Journal of Phycology**, v. 51, n. 5, p. 821–837, 2015. Blackwell Publishing Inc. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26986880/>>. Acesso em: 23/11/2020.

HAFTING, J. T.; CRITCHLEY, A. T.; CORNISH, M. L.; HUBLEY, S. A.; ARCHIBALD, A. F. On-land cultivation of functional seaweed products for human usage. **Journal of Applied Phycology**, v. 24, n. 3, p. 385–392, 2012. Springer. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-011-9720-1>>. Acesso em: 23/11/2020.

HARGREAVES, P. I. **PRODUÇÃO DE ETANOL A PARTIR DE *Kappaphycus alvarezii* - BIOCOMBUSTÍVEL DE TERCEIRA GERAÇÃO**, 2012. UFRJ. Disponível em: <<http://186.202.79.107/download/producao-de-etanol-a-partir-de-kappaphycus-alvarezii.pdf>>. .

HARGREAVES, P. I.; BARCELOS, C. A.; DA COSTA, A. C. A.; PEREIRA, N. Production of ethanol 3G from *Kappaphycus alvarezii*: Evaluation of different process strategies. **Bioresource Technology**, v. 134, p. 257–263, 2013. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.02.002>>. .

HAYASHI, L.; BULBOA, C.; KRADOLFER, P.; SORIANO, G.; ROBLEDO, D. Cultivation of red seaweeds: a Latin American perspective. **Journal of Applied Phycology**, v. 26, n. 2, p. 719–727, 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10811-013-0143-z>>. .

HAYASHI, L.; SANTOS, A. A.; FARIA, G. S. M.; et al. *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Areschougiales) cultivated in subtropical waters in Southern Brazil. **Journal of Applied Phycology**, v. 23, n. 3, p. 337–343, 2011. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10811-010-9543-5>>. Acesso em: 23/11/2020.

HAYKIRI-ACMA, H.; YAMAN, S. Interaction between biomass and different rank coals during co-pyrolysis. **Renewable Energy**, v. 35, n. 1, p. 288–292, 2010. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.001>>. .

HINGSAMER, M.; JUNGMEIER, G. Biorefineries. **The Role of Bioenergy in the Bioeconomy**. p.179–222, 2019. Elsevier. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128130568000054>>. Acesso em: 2/5/2019.

HOLANDA, T. DE B. L. **OBTENÇÃO DE BIOMASSA DA MACROALGA AGARÓFITA *Gracilaria birdiae* (PLASTINO & OLIVEIRA) ATRAVÉS DA GERMINAÇÃO DE ESPOROS EM CONDIÇÕES DE LABORATÓRIO.** FORTALEZA, 2016. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/30097/3/2016_tese_tblholanda.pdf>. Acesso em: 19/9/2020.

HONG, I. K.; JEON, H.; LEE, S. B. Comparison of red, brown and green seaweeds on enzymatic saccharification process. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 20, n. 5, p. 2687–2691, 2014. The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2013.10.056>>. .

IBGE. IBGE | Cidades@ | Rio Grande do Norte | Rio do Fogo | Panorama. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rn/rio-do-fogo/panorama>>. Acesso em: 27/11/2020a.

IBGE. IBGE | Cidades@ | Rio Grande do Norte | Extremoz | Panorama. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rn/extremoz/panorama>>. Acesso em: 27/11/2020b.

IBGE. Tabela 5429: Rendimento médio nominal, habitualmente recebido por mês e efetivamente recebido no mês de referência, do trabalho principal e de todos os trabalhos, por sexo. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5429>>. Acesso em: 26/5/2021a.

IBGE. Pesquisa de Orçamentos Familiares - POF 2017-2018: cerca de ¼ da renda disponível das famílias brasileiras é não monetária. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/29490-pof-2017-2018-cerca-de-da-renda-disponivel-das-familias-brasileiras-e-nao-monetaria>>. Acesso em: 25/5/2021b.

ICN. International Code of Nomenclature for algae, fungi, and plants. Disponível em: <<https://www.iapt-taxon.org/nomen/main.php>>. Acesso em: 28/9/2020.

IDEMA. **Perfil do Rio Grande do Norte.** 2014.

IEA BIOENERGY. **Bioenergy for Sustainable Development.** 2017.

JIANG, R.; INGLE, K. N.; GOLBERG, A. Macroalgae (seaweed) for liquid transportation biofuel production: what is next? **Algal Research**, v. 14, p. 48–57, 2016. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.algal.2016.01.001>>. .

JIANG, W.; FU, Y.; YANG, F.; et al. *Gracilaria lemaneiformis* polysaccharide as integrin-targeting surface decorator of selenium nanoparticles to achieve enhanced anticancer efficacy. **ACS Applied Materials and Interfaces**, v. 6, n. 16, p. 13738–13748, 2014.

JIAO, G.; YU, G.; ZHANG, J.; EWART, H. S. Chemical structures and bioactivities of sulfated polysaccharides from marine algae. **Marine Drugs**, v. 9, n. 2, p. 196–233, 2011.

DE JONG, E., VAN REE, R., KWANT, I. K. **Biorefineries: adding value to the sustainable utilisation of biomass.** 2009.

JUNIOR, C. I.; GREGORIO, L. M.; FRANCISCO, M.; HUGO, S.; ARTICULO, D. Análisis multitemporal de la cobertura boscosa empleando la metodología de teledetección espacial y SIG en la sub-cuenca del río Coroico - provincia Caranavi en los años 1989 – 2014. Multitemporal analysis of forest cover using spatial remote sensing and . **of the Selva Andina Research Society. Bolivia.**, 2018. Disponível em: <http://www.scielo.org.bo/pdf/jsars/v9n1/v9n1_a03.pdf>. .

KHAMBHATY, Y.; MODY, K.; GANDHI, M. R.; et al. Kappaphycus alvarezii as a source of bioethanol. **Bioresource Technology**, v. 103, n. 1, p. 180–185, 2012. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.015>>. .

KIM, J. K.; KRAEMER, G. P.; YARISH, C. Field scale evaluation of seaweed aquaculture as a nutrient bioextraction strategy in Long Island Sound and the Bronx River Estuary. **Aquaculture**, v. 433, p. 148–156, 2014. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.05.034>>. .

KNOWLER, D.; CHOPIN, T.; MARTÍNEZ-ESPIÑEIRA, R.; et al. The economics of Integrated Multi-Trophic Aquaculture: where are we now and where do we need to go? **Reviews in Aquaculture**, v. 12, n. 3, p. raq.12399, 2020. Wiley-Blackwell. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/raq.12399>>. Acesso em: 23/11/2020.

KRAAN, S. Mass-cultivation of carbohydrate rich macroalgae, a possible solution for sustainable biofuel production. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 18, n. 1, p. 27–46, 2013.

KUMAR, K.; GHOSH, S.; ANGELIDAKI, I.; et al. Recent developments on biofuels production from microalgae and macroalgae. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 235–249, 2016. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.055>>. .

KUMAR, S.; GUPTA, R.; KUMAR, G.; SAHOO, D.; KUHAD, R. C. Bioethanol production from Gracilaria verrucosa, a red alga, in a biorefinery approach. **Bioresource Technology**, v. 135, p. 150–156, 2013. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.120>>. .

KURT, W. V. Taresund. Disponível em: <<https://maritimt.com/nb/batomtaler/taresund-112017>>. Acesso em: 7/4/2021.

LAGO, C.; HERRERA, I.; CALDÉS, N.; LECHÓN, Y. Nexus Bioenergy–Bioeconomy. **The Role of Bioenergy in the Bioeconomy**. p.3–24, 2019. Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128130568000017>>. Acesso em: 2/5/2019.

LEANDRO, A.; PEREIRA, L.; GONÇALVES, A. M. M. Diverse Applications of Marine Macroalgae. **Marine Drugs**, v. 18, n. 1, p. 17, 2019. Disponível em: <www.mdpi.com/journal/marinedrugs>. .

LEÃO, Z. M. A. N.; KIKUCHI, R. K. P.; TESTA, V. Corals and coral reefs of Brazil. **Latin American Coral Reefs**. p.9–52, 2003. Elsevier. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444513885500035>>. .

LEHAHN, Y.; INGLE, K. N.; GOLBERG, A. Global potential of offshore and shallow

waters macroalgal biorefineries to provide for food, chemicals and energy: feasibility and sustainability. **Algal Research**, v. 17, p. 150–160, 2016. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.algal.2016.03.031>>. .

LIU, Y.; SAITOH, S.-I.; RADIARTA, I. N.; et al. Improvement of an aquaculture site-selection model for Japanese kelp (*Saccharinajaponica*) in southern Hokkaido, Japan: an application for the impacts of climate events. **ICES Journal of Marine Science**, v. 70, n. 7, p. 1460–1470, 2013. Disponível em: <<https://academic.oup.com/icesjms/article/70/7/1460/609876>>. .

LOUREIRO, R.; GACHON, C. M. M.; REBOURS, C. Seaweed cultivation: potential and challenges of crop domestication at an unprecedented pace. **New Phytologist**, v. 206, n. 2, p. 489–492, 2015. Blackwell Publishing Ltd. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nph.13278>>. Acesso em: 23/3/2021.

M.D. GUIRY IN GUIRY, M.D. & GUIRY, G. M. 2020. Notulae Algarum: An Online Journal for Algae. Disponível em: <<http://www.notulaealgarum.com/>>. Acesso em: 3/11/2020.

MAEHRE, H. K.; MALDE, M. K.; EILERTSEN, K.-E.; ELVEVOLL, E. O. Characterization of protein, lipid and mineral contents in common Norwegian seaweeds and evaluation of their potential as food and feed. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 94, n. 15, p. 3281–3290, 2014. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/jsfa.6681>>. .

MAGNUSSON, M.; CARL, C.; MATA, L.; DE NYS, R.; PAUL, N. A. Seaweed salt from *Ulva*: A novel first step in a cascading biorefinery model. **Algal Research**, v. 16, p. 308–316, 2016.

MAKKAR, H. P. S.; TRAN, G.; HEUZÉ, V.; et al. Seaweeds for livestock diets: A review. **Animal Feed Science and Technology**, v. 212, p. 1–17, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.09.018>www.elsevier.com/locate/anifeedsci <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.09.0180377-8401>/<http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.09.018>>. Acesso em: 19/9/2020.

MARQUES, L. G. E. **Aminoácidos tipo micospolina : novas metodologias e distribuição em macroalgas da costa brasileira** Universidade de São Paulo - Tese (Doutorado em Bioquímica), 2015. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/46/46131/tde-20072015-155636/>>. .

MASCHEK, J. A.; BAKER, B. J. The Chemistry of Algal Secondary Metabolism. **Algal Chemical Ecology**. v. 9783540741, p.1–24, 2008. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-74181-7_1>. .

MAZARRASA, I.; OLSEN, Y. S.; MAYOL, E.; MARBÀ, N.; DUARTE, C. M. Global unbalance in seaweed production, research effort and biotechnology markets. **Biotechnology Advances**, v. 32, n. 5, p. 1028–1036, 2014. Elsevier Inc. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2014.05.002>>. .

MAZUMDER, S.; GHOSAL, P. K.; PUJOL, C. A.; et al. Isolation, chemical investigation and antiviral activity of polysaccharides from *Gracilaria corticata* (Gracilariaceae, Rhodophyta). **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 31, n. 1–3, p. 87–95, 2002.

MCHUGH, D. J. **A guide to the seaweed industry**. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2003.

MMA. **ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA CONSERVAÇÃO, USO SUSTENTÁVEL E REPARTIÇÃO DE BENEFÍCIOS DA BIODIVERSIDADE BRASILEIRA**. Ministério do Meio Ambiente, 2007.

MUKHERJEE, A.; PATEL, J. S. Seaweed extract: biostimulator of plant defense and plant productivity. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 17, n. 1, p. 553–558, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13762-019-02442-z>>. Acesso em: 23/7/2020.

NASA. **Landsat 7 Handbook**. 2011.

NATH, S. S.; BOLTE, J. P.; ROSS, L. G.; AGUILAR-MANJARREZ, J. Applications of geographical information systems (GIS) for spatial decision support in aquaculture. **Aquacultural Engineering**, v. 23, n. 1–3, p. 233–278, 2000. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0144860900000510>>. .

NEORI, A.; CHOPIN, T.; TROELL, M.; et al. Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. **Aquaculture**, v. 231, n. 1–4, p. 361–391, 2004. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0044848603007841>>. .

NIMER, E. **Climatologia do Brasil / Edmon Nimer**. 2.ed. ed. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989.

NORTON, T. A.; MELKONIAN, M.; ANDERSEN, R. A. Algal biodiversity. **Phycologia**, v. 35, n. 4, p. 308–326, 1996. International Phycological Society. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.2216/i0031-8884-35-4-308.1>>. Acesso em: 31/8/2020.

OECD/IEA. **Technology Roadmap: Delivering Sustainable Bioenergy**. 2017.

OHNO, M. **Seaweed resources of the world**. Yokosuka Japan: Kanagawa International Fisheries Training Center Japan International Cooperative Agency, 1998.

OLIVEIRA, E. C. **Algas bentônicas do Brasil**, 1977. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/livredocencia/41/tde-14032013-171424/publico//LivreDocencia_Eurico.pdf>. .

OLIVEIRA, E. C. Algas marinhas: Um recurso pouco explotavel pelo Brasil. **Panorama da Aquicultura**, p. 7 (41): 24-26, 1997. Disponível em: <<https://panoramadaaquicultura.com.br/algas-marinhas/>>. Acesso em: 12/11/2020.

OLIVEIRA, E. C.; ALVEAL, K.; ANDERSON, R. J. Mariculture of the Agar-Producing Gracilarioid Red Algae. **Reviews in Fisheries Science**, v. 8, n. 4, p. 345–377, 2000. CRC Press LLC. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10408340308951116>>. Acesso em: 9/10/2020.

OLIVEIRA, E. C. DE. The Seaweed Resources of the Brazil. **Seaweed Resources of**

world. first ed., p.366, 1998. Japan: Japan International Collaboration Agency (JICA). Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/310822595_Seaweed_Resources_of_the_World_Editors_Alan_T_Critchley1_Masao_Ohno2_Danilo_Largo3_and_Russell_Gillespie1_1_University_of_the_Witwatersrand_Johannesburg_South_Africa_2_Kochi_University_Kochi_Japan_3_U>. Acesso em: 16/10/2020.

OLIVEIRA, E. C. DE. Macroalgas marinhas da costa brasileira: estado do conhecimento, usos e conservação biológica. **Biodiversidade, conservação e uso sustentável da flora do Brasil**, 2002.

OLIVEIRA, E. C. DE; HORTA, P. A.; AMANCIO, C. E.; ANNA, C. L. S. Algas e angiospermas marinhas bêmicas do litoral brasileiro. **Macrodiagnóstico da Zona Costeira do Brasil**, p. 1–60, 2001. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf_chm_rbbio/_arquivos/plantas_marinhas.pdf>. .

OLIVEIRA, E.; PLASTINO, E. Gracilariaceae. In,(I. Akatsuka, ed.) *Biology of Economic Algae*. , 1994.

OLIVEIRA, V. P. DE. **INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE E DOS PARÂMETROS AMBIENTAIS SOBRE O DESENVOLVIMENTO DE *Gracilaria birdiae* (RHODOPHYTA, GRACILARIALES) EM VIVEIRO CAMARÃO.**, 2007. UFRN.

Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/12471/1/InfluênciaProfundidadeParâmetros_Oliveira_2007.pdf>. .

OLIVEIRA, V. P. DE; FREIRE, A. R. S.; PEREIRA, D. C. .; CARNEIRO, M. A. A.; SORIANO, E. . M. Interação dos fatores abióticos no crescimento de *Gracilaria birdiae* em viveiro de camarão no estado do Rio Grande Do Norte - Brasil. **Congresso de Ecologia do Brasil**, , n. June 2020, p. 1–2, 2007.

OLIVEIRA, V. P.; FREIRE, F. A. M. & SORIANO, E. M. INFLUENCE OF DEPTH ON THE GROWTH OF THE SEAWEED GRACILARIA BIRDIAE (RHODOPHYTA) IN A SHRIMP POND. **Braz. J. Aquat. Sci. Technol**, v. 16, n. 1, p. 33–39, 2012.

ONU. **World Population Prospects 2017**. 2017.

ONU. Mulheres conquistam independência financeira com projeto de maricultura no RN. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/mulheres-conquistam-independencia-financeira-com-projeto-de-maricultura-no-rn/>>. Acesso em: 25/8/2020a.

ONU. Mulheres conquistam independência financeira com projeto de maricultura no RN _ ONU Brasil. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/mulheres-conquistam-independencia-financeira-com-projeto-de-maricultura-no-rn/>>. .

PAULA, B. B. DE. **AMINOÁCIDOS DO TIPO MICOSPORINA EM MACROALGAS VERMELHAS AO LONGO DA COSTA BRASILEIRA: OCORRÊNCIA, VARIAÇÃO E RELAÇÕES COM FATORES ABIÓTICOS**, 2017. UFSC.

PAULA, E. J. DE; PEREIRA, R. T. L.; OHNO, M. Growth rate of the carrageenophyte *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Gigartinales) introduced in subtropical waters of Sao Paulo State, Brazil. **Phycological Research**, v. 50, n. 1, p. 1–9, 2002. Blackwell Publishing. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1046/j.1440-1835.2002.00248.x>>.

Acesso em: 24/11/2020.

PELLIZZARI, F.; REIS, R. P. Seaweed cultivation on the Southern and Southeastern Brazilian Coast. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 21, n. 2, p. 305–312, 2011. Sociedade Brasileira de Farmacognosia. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-695X2011000200016&lng=en&nrm=iso&tlng=en>. Acesso em: 23/11/2020.

PEREIRA, L. A.; MOREIRA, R.; ROCHA, D. A. A MARICULTURA E AS BASES ECONÔMICAS, SOCIAL E AMBIENTAL QUE DETERMINAM SEU DESENVOLVIMENTO E SUSTENTABILIDADE. **Ambiente & Sociedade**, v. XVIII, n. 3, p. 41–54, 2015. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/asoc/v18n3/1809-4422-asoc-18-03-00041.pdf>>. Acesso em: 16/5/2021.

PEREIRA, L. A.; ROCHA, R. M. DA. Mariculture and economic, social and environmental bases that determine development and sustainability. **Ambiente e Sociedade**, v. 18, n. 3, p. 41–54, 2015. Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2015000300004&lng=en&nrm=iso&tlng=pt>. Acesso em: 1/9/2020.

PETEIRO, C.; FREIRE, Ó. Outplanting time and methodologies related to mariculture of the edible kelp *Undaria pinnatifida* in the Atlantic coast of Spain. **Journal of Applied Phycology**, v. 24, n. 6, p. 1361–1372, 2012. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10811-012-9788-2>>. .

PETEIRO, C.; SÁNCHEZ, N.; DUEÑAS-LIAÑO, C.; MARTÍNEZ, B. Open-sea cultivation by transplanting young fronds of the kelp *Saccharina latissima*. **Journal of Applied Phycology**, v. 26, n. 1, p. 519–528, 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10811-013-0096-2>>. .

PIONER, C. Preservação da cultura. Disponível em: <<https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/regiao/preservacao-da-cultura-1.1568101>>. Acesso em: 20/5/2021.

PIRES, J. C. M. COP21: The algae opportunity? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, n. September 2016, p. 867–877, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.197>>. .

PLASTINO, E.M. & OLIVEIRA, E. C. *Gracilaria birdiae* (Gracilariales, Rhodophyta), a new species from the tropical South American Atlantic with a terete frond and deep spermatangial conceptacles. **Phycologia**, v. 41, n. 4, p. 389–396, 2002. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.2216/i0031-8884-41-4-389.1>>. .

PORSE, H.; RUDOLPH, B. The seaweed hydrocolloid industry: 2016 updates, requirements, and outlook. **Journal of Applied Phycology**, v. 29, n. 5, p. 2187–2200, 2017. Journal of Applied Phycology. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10811-017-1144-0>>. .

PRÊMIO CIENTÍFICO MÁRIO QUARTIN GRAÇA. Estudos inovadores sobre escrita, desempenho das empresas e biocombustíveis vencem Prêmio Científico Mário Quartin Graça | Casa da América Latina. Disponível em: <<http://casamericalatina.pt/2020/10/26/estudos-inovadores-sobre-escrita-desempenho-das-empresas-e-biocombustiveis-vencem-premio-cientifico-mario-quartin-graca/>>. Acesso em: 9/11/2020.

QIN, Y. Seaweed Bioresources. **Bioactive Seaweeds for Food Applications**. p.3–24, 2018. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813312-5.00001-7>>.

RADIARTA, I. N.; SAITOH, S.-I.; MIYAZONO, A. GIS-based multi-criteria evaluation models for identifying suitable sites for Japanese scallop (*Mizuhopecten yessoensis*) aquaculture in Funka Bay, southwestern Hokkaido, Japan. **Aquaculture**, v. 284, n. 1–4, p. 127–135, 2008. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.07.048>>. .

REBOUÇAS, R. F. D. C. **Estudo do Teor de Lipídios e Avaliação dos resíduos das Algas Marinhas: Gracilaria caudata, Gracilaria birdiae, Gracilaria domingensis para preparação de Biodiesel e Biofertilizante.**, 2013. Universidade do Estado do Rio Grande do Norte - UERN. Disponível em: <http://www.uern.br/controladepaginas/mestrado-dissertacoes/arquivos/0631texto_completo_rosinere_ferreira_da_costa_reboucas.pdf> . .

REBOURS, C.; SORIANO, E. M.; ZERTUCHE-GONZÁLEZ, J. A.; et al. Seaweeds: an opportunity for wealth and sustainable livelihood for coastal communities. **Journal of Applied Phycology**, v. 26, n. 5, p. 1939–1951, 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10811-014-0304-8>>. .

REIS, R. P.; BASTOS, M.; GÓES, H. G. Cultivo de *Kappaphycus alvarezii* no litoral do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://panoramadaaquicultura.com.br/cultivo-de-kappaphycus-alvarezii-no-litoral-do-rio-de-janeiro/>>. Acesso em: 24/11/2020.

REIS, R. P.; CASTELAR, B.; SANTOS, A. A. DOS. Why is algaculture still incipient in Brazil? **Journal of Applied Phycology**, v. 29, n. 2, p. 673–682, 2017. Journal of Applied Phycology. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10811-016-0890-8>>. .

RIOUX, L. E.; TURGEON, S. L. Seaweed carbohydrates. **Seaweed Sustainability: Food and Non-Food Applications**, 2015.

RIOUX, L.; TURGEON, S. L. Seaweed carbohydrates. **Seaweed Sustainability: Food and Non-Food Applications**. p.141–192, 2015. Elsevier Inc. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-418697-2/00007-6>>. .

ROESIJADI, G.; JONES, S. B.; SNOWDEN-SWAN, L. J.; ZHU, Y. **Macroalgae as a Biomass Feedstock: A Preliminary Analysis**. Richland, WA (United States), 2010. RUPÉREZ, P. Mineral content of edible marine seaweeds. **Food Chemistry**, v. 79, n. 1, p. 23–26, 2002.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15, n. 3, p. 234–281, 1977. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022249677900335>>. .

SADHUKHAN, J.; GADKARI, S.; MARTINEZ-HERNANDEZ, E.; et al. Novel macroalgae (seaweed) biorefinery systems for integrated chemical, protein, salt, nutrient and mineral extractions and environmental protection by green synthesis and life cycle sustainability assessments. **Green Chemistry**, v. 21, n. 10, p. 2635–2655, 2019.

SALAM, M. A.; ROSS, L. G.; BEVERIDGE, C. M. A comparison of development opportunities for crab and shrimp aquaculture in southwestern Bangladesh, using GIS modelling. **Aquaculture**, v. 220, n. 1–4, p. 477–494, 2003.

SAMARAKOON, K.; JEON, Y.-J. Bio-functionalities of proteins derived from marine algae — A review. **Food Research International**, v. 48, n. 2, p. 948–960, 2012. Elsevier. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963996912001214>>. Acesso em: 12/10/2020.

SÁNCHEZ, J.; CURT, M. D.; ROBERT, N.; FERNÁNDEZ, J. Biomass Resources. **The Role of Bioenergy in the Bioeconomy**. p.25–111, 2019. Elsevier. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128130568000029>>. Acesso em: 2/5/2019.

SANTOS JÚNIOR, J. DOS; REBOUÇAS, L. DE O. S.; FIGUEIREDO, J. P. DO V.; BESSA JÚNIOR, A. P.; MAIA, I. DE S. Viabilidade econômica de um produto a base de algas em uma associação de maricultoras do litoral Norte Potiguar. **Pubvet**, v. 11, n. 4, p. 313–339, 2017. Disponível em: <<http://www.pubvet.com.br/artigo/3736/viabilidade-econocircmica-de-um-produto-a-base-de-algas-em-uma-associaccedilatildeo-de-maricultoras-do-litoral-norte-potiguar>>.

SANTOS, L. B. **CARACTERIZAÇÃO DAS COMUNIDADES ALGAS NA ÁREA DE PRESERVAÇÃO AMBIENTAL DOS RECIFES DE CORAIS(APARC), RN: SUBSÍDIOS PARA MONITORAMENTO E CONSERVAÇÃO.**, 2015.

SANTOS, P. S. DOS. **Potencial Antibiótico , Antioxidante e Teste de Toxicidade frente Artemia salina de extratos de Gracilaria (Rhodophyta , Gracilariales)**, 2015. UFBA.

SCARLAT, N.; DALLEMAND, J.-F. Future Role of Bioenergy. **The Role of Bioenergy in the Emerging Bioeconomy**. p.435–547, 2019. Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128130568000108#p0125>>. Acesso em: 3/5/2019.

SCARLAT, N.; DALLEMAND, J.-F.; MONFORTI-FERRARIO, F.; NITA, V. The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy: Policies and facts. **Environmental Development**, v. 15, n. 2015, p. 3–34, 2015. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envdev.2015.03.006>>.

SHUKLA, R.; KUMAR, M.; CHAKRABORTY, S.; et al. Process development for the production of bioethanol from waste algal biomass of *Gracilaria verrucosa*. **Bioresource Technology**, v. 220, p. 584–589, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.096>>.

SILVA, I. B. **Algas marinhas bentônicas dos recifes e ambientes adjacentes de Maracajaú , APA dos Recifes de Corais , RN , Brasil**, 2010. Disponível em: <http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/pgibt/2013/09/Ingrid_Balesteros_Silva_DR.pdf>.

SILVA, I. B.; FUJII, M. T.; SORIANO, E. M. Influence of tourist activity on the diversity of seaweed from reefs in Maracajaú, Atlantic ocean, Northeast Brazil. **Brazilian Journal of Pharmacognosy**, v. 22, n. 4, p. 889–893, 2012.

SILVA, R. R. DA; BACHA, C. J. C. Polígonos de Voronoi como alternativa aos problemas das áreas mínimas comparáveis: uma análise das mudanças populacionais na região norte do Brasil. **Revista Brasileira de Estudos de População**, v. 28, n. 1, p. 133–151, 2011. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-30982011000100007&lng=pt&nrm=iso&tlng=en>. .

SIMIONI, C.; HAYASHI, L.; OLIVEIRA, M. C. Seaweed resources of Brazil: what has changed in 20 years? **Botanica Marina**, v. 62, n. 5, p. 433–441, 2019. Disponível em:

<<http://www.degruyter.com/view/j/botm.2019.62.issue-5/bot-2019-0021/bot-2019-0021.xml>>. .

SONDAK, C. F. A.; ANG, P. O.; BEARDALL, J.; et al. Carbon dioxide mitigation potential of seaweed aquaculture beds (SABs). **Journal of Applied Phycology**, v. 29, n. 5, p. 2363–2373, 2016. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10811-016-1022-1>>. Acesso em: 28/3/2019.

SORIANO, E. M. Historical context of commercial exploitation of seaweeds in Brazil. **Journal of Applied Phycology**, v. 29, n. 2, p. 665–671, 2017. *Journal of Applied Phycology*. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10811-016-0866-8>>. .

SORIANO, E. M.; MORALES, C.; MOREIRA, W. S. C. Cultivation of *Gracilaria* (Rhodophyta) in shrimp pond effluents in Brazil. **Aquaculture Research**, v. 33, n. 13, p. 1081–1086, 2002. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1046/j.1365-2109.2002.00781.x>>. .

SORIANO, E. M.; NUNES, S. O.; CARNEIRO, M. A. A.; PEREIRA, D. C. Nutrients' removal from aquaculture wastewater using the macroalgae *Gracilaria birdiae*. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 2, p. 327–331, 2009. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.07.002>>. .

SORIANO, E. M.; W.S.C., M.; M.A.A., C. Some Aspects of the Growth of *Gracilaria birdiae* (Gracilariales, Rhodophyta) in an Estuary in Northeast Brazil. **Aquaculture International**, v. 14, n. 4, p. 327–336, 2006. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10499-005-9032-z>>. .

SOUSA, F. E. S. DE; MOURA, E. A.; SORIANO, E. M. Use of geographic information systems (GIS) to identify adequate sites for cultivation of the seaweed *Gracilaria birdiae* in Rio Grande do Norte, Northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 22, n. 4, p. 868–873, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-695X2012000400023&lng=en&nrm=iso&tlng=en>. .

SOUZA, B. W. S.; CERQUEIRA, M. A.; BOURBON, A. I.; et al. Chemical characterization and antioxidant activity of sulfated polysaccharide from the red seaweed *Gracilaria birdiae*. **Food Hydrocolloids**, v. 27, n. 2, p. 287–292, 2012. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.10.005>>. .

SOUZA, B. W. S.; CERQUEIRA, M. A.; MARTINS, J. T.; et al. Antioxidant Potential of Two Red Seaweeds from the Brazilian Coasts. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 59, n. 10, p. 5589–5594, 2011. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jf200999n>>. .

STÉVANT, P.; REBOURS, C.; CHAPMAN, A. Seaweed aquaculture in Norway: recent industrial developments and future perspectives. **Aquaculture International**, v. 25, n. 4, p. 1373–1390, 2017. Disponível em: <www.sintef.no>. Acesso em: 7/4/2021.

STORTARE. Stortare – din beste venn i kos og nød - Industri Energi. Disponível em: <<https://www.industrienergi.no/nyhet/stortare-beste-venn-kos-nod/>>. Acesso em: 7/4/2021.

SUDHAKAR, K.; MAMAT, R.; SAMYKANO, M.; et al. An overview of marine macroalgae as bioresource. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, p. 165–179, 2018.

TAN, I. S.; LEE, K. T. Enzymatic hydrolysis and fermentation of seaweed solid wastes for bioethanol production: An optimization study. **Energy**, v. 78, p. 53–62, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.080>>. .

THOMSEN, M. S.; STAEHR, P. A.; NEJRUP, L.; SCHIEL, D. R. Effects of the invasive macroalgae *Gracilaria vermiculophylla* on two co-occurring foundation species and associated invertebrates. **Aquatic Invasions**, v. 8, n. 2, p. 133–145, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3391/ai.2013.8.2.02>>. Acesso em: 9/10/2020.

TORRES, P. B. **Caracterização química e atividades biológicas de algumas espécies nativas de *Gracilaria* de importância econômica.**, 6. jun. 2017. São Paulo: Universidade de São Paulo. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/41132/tde-23052017-142455/pt-br.php>>. .

TORRES, P.; SANTOS, J. P.; CHOW, F.; DOS SANTOS, D. Y. A. C. A comprehensive review of traditional uses, bioactivity potential, and chemical diversity of the genus *Gracilaria* (Gracilariales, Rhodophyta). **Algal Research**, v. 37, n. December 2018, p. 288–306, 2019. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.12.009>>. .

TROELL, M.; HALLING, C.; NEORI, A.; et al. Integrated mariculture: asking the right questions. **Aquaculture**, v. 226, n. 1–4, p. 69–90, 2003. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0044848603004691>>. .

UFV. Nutricionistas da Ufv criam produtos alimentícios à base de algas marinhas visando o desenvolvimento social de comunidades costeiras | PPG. Disponível em: <<http://www.ppg.ufv.br/?noticias=nutricionistas-da-ufv-criam-produtos-alimenticios-a-base-de-algas-marinhas-visando-o-desenvolvimento-social-de-comunidades-costeiras>>. Acesso em: 5/3/2021.

URSI, S.; COSTA, V. L.; HAYASHI, L.; et al. Intraspecific variation in *Gracilaria birdiae* (Gracilariales, Rhodophyta): growth, and agar yield and quality of color strains under aquaculture. **Botanica Marina**, v. 56, n. 3, p. 241–248, 2013. Disponível em: <<https://www.degruyter.com/view/j/botm.2013.56.issue-3/bot-2012-0219/bot-2012-0219.xml>>. .

USDA. **Alginates Handling/Processing**. 2015.

USGS. USGS.gov | Science for a changing world. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/>>. Acesso em: 31/5/2021.

VIEIRA, M. B. **QUANTITATIVE SUSTAINABILITY ANALYSIS OF THIRD GENERATION BIOFUELS USING PROCESS DATA FROM MICROALGAE BIOREFINERY**, 2018.

VITAL, H.; TABOSA; LIMA EUGÊNIO PIRES, F. I. M. DA S. V. E. A. F. T. L. DE M. F. E. S. DE S. M. DOS S. C. Z. M. C.; DE ARAÚJO MICHAEL VANDEESTEIN SILVA, S. T. W. F. A. B. Beaches of Rio Grande do Norte. **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. p.201–229, 2016. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-30394-9_8>. .

WEI, N.; QUARTERMAN, J.; JIN, Y.-S. Marine macroalgae: an untapped resource for producing fuels and chemicals. **Trends in Biotechnology**, v. 31, n. 2, p. 70–77, 2013. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tibtech.2012.10.009>>. .

WHITE, W. L.; WILSON, P. World seaweed utilization. **Seaweed Sustainability**. p.7–26, 2015. Elsevier Inc. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-418697-2/00002-7>>. .