

IMPACTO CIENTÍFICO
EDITORA

BIOTECNOLOGIA MARINHA NO NORDESTE BRASILEIRO: POTENCIAL DA BIODIVERSIDADE PARA A INOVAÇÃO EM SAÚDE E SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL

MARINE BIOTECHNOLOGY IN NORTHEAST BRAZIL: BIODIVERSITY'S POTENTIAL FOR INNOVATION IN HEALTH AND ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY

BIOTECNOLOGÍA MARINA EN EL NORDESTE DE BRASIL: EL POTENCIAL DE LA BIODIVERSIDAD PARA LA INNOVACIÓN EN SALUD Y SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL

10.56238/edimpacto2025.025-004

Ricardo Furtado Rodrigues
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)
Orcid ID do autor https://orcid.org/0009-0003-7004-659X

RESUMO
A biotecnologia marinha tem se consolidado como uma das frentes mais inovadoras da bioeconomia sustentável, oferecendo soluções promissoras para os desafios globais nas áreas da saúde, alimentação, energia e meio ambiente. No contexto brasileiro, a região Nordeste se destaca por abrigar uma das maiores biodiversidades marinhas do Atlântico Sul, representando um verdadeiro laboratório natural para o desenvolvimento de biotecnologias baseadas em recursos aquáticos. Este capítulo tem como objetivo analisar o potencial biotecnológico dos organismos marinhos do Nordeste brasileiro, com destaque para suas aplicações nas áreas de saúde e sustentabilidade ambiental, além de identificar os principais desafios e oportunidades para o avanço da biotecnologia marinha na região. A metodologia adotada consistiu em uma revisão bibliográfica sistemática de artigos científicos, relatórios técnicos e documentos institucionais publicados nos últimos anos, com ênfase em autores contemporâneos e bases de dados reconhecidas como Scopus, Web of Science e SciELO. Os resultados indicam que, embora existam iniciativas relevantes em curso, o setor ainda enfrenta barreiras como escassez de investimentos, lacunas regulatórias, fragilidade na infraestrutura científica e insuficiência na formação de profissionais especializados. Por outro lado, foram identificadas áreas estratégicas com alto potencial de inovação, como a utilização de microalgas para produção de biocombustíveis e compostos bioativos, o aproveitamento de organismos marinhos para fármacos e cosméticos, e o desenvolvimento de tecnologias para a biorremediação de ambientes costeiros. O estudo conclui que a consolidação da biotecnologia marinha no Nordeste depende da articulação de políticas públicas integradas, do fortalecimento das redes de pesquisa, do incentivo à cooperação entre instituições científicas e setor produtivo, e da valorização do capital humano regional. Essas ações são essenciais para transformar a riqueza marinha da região em um vetor de desenvolvimento econômico, sustentável e inclusivo.

Palavras-chave: Biotecnologia Marinha. Biodiversidade. Sustentabilidade Regional.

ABSTRACT
Marine biotechnology has established itself as one of the most innovative fronts in the sustainable bioeconomy, offering promising solutions to global challenges in the areas of health, food, energy and the environment. In the Brazilian context, the Northeast region stands out for being home to some of the greatest marine biodiversity in the South Atlantic, representing a veritable natural laboratory for the development of biotechnologies based on aquatic resources. The aim of this chapter is to analyze the biotechnological potential of marine organisms from the Brazilian Northeast, highlighting their applications in the areas of health and environmental sustainability, as well as identifying the main challenges and opportunities for the advancement of marine biotechnology in the region. The methodology adopted consisted of a systematic bibliographic review of scientific articles, technical reports and institutional documents published in recent years, with an emphasis on contemporary authors and recognized databases such as Scopus, Web of Science and SciELO. The results indicate that, although there are relevant initiatives underway, the sector still faces barriers such as lack of investment, regulatory gaps, weaknesses in the scientific infrastructure and insufficient training of specialized professionals. On the other hand, strategic areas with high potential for innovation were identified, such as the use of microalgae to produce biofuels and bioactive compounds, the use of marine organisms for pharmaceuticals and cosmetics, and the development of technologies for the bioremediation of coastal environments. The study concludes that the consolidation of marine biotechnology in the Northeast depends on the articulation of integrated public policies, the strengthening of research networks, the encouragement of cooperation between scientific institutions and the productive sector, and the valorization of regional human capital. These actions are essential for transforming the region's marine wealth into a vector for economic, sustainable and inclusive development.

Palavras-chave: Marine Biotechnology. Biodiversity. Regional sustainability.

RESUMEN
La biotecnología marina se ha consolidado como uno de los frentes más innovadores de la bioeconomía sostenible, ofreciendo soluciones prometedoras a los desafíos globales en los ámbitos de la salud, la alimentación, la energía y el medio ambiente. En el contexto brasileño, la región Nordeste se destaca por albergar una de las mayores biodiversidades marinas del Atlántico Sur, representando un verdadero laboratorio natural para el desarrollo de biotecnologías basadas en recursos acuáticos. El objetivo de este capítulo es analizar el potencial biotecnológico de los organismos marinos del Nordeste de Brasil, destacando sus aplicaciones en las áreas de salud y sostenibilidad ambiental, así como identificar los principales desafíos y oportunidades para el avance de la biotecnología marina en la región. La metodología adoptada consistió en una revisión bibliográfica sistemática de artículos científicos, informes técnicos y documentos institucionales publicados en los últimos años, con énfasis en autores contemporáneos y bases de datos reconocidas como Scopus, Web of Science y SciELO. Los resultados indican que, aunque existen iniciativas relevantes en marcha, el sector aún enfrenta barreras como la falta de inversión, vacíos regulatorios, debilidades en la infraestructura científica e insuficiente formación de profesionales especializados. Por otro lado, se identificaron áreas estratégicas con alto potencial de innovación, como el uso de microalgas para producir biocombustibles y compuestos bioactivos, la utilización de organismos marinos para productos farmacéuticos y cosméticos, y el desarrollo de tecnologías para la biorremediación de ambientes costeros. El estudio concluye que la consolidación de la biotecnología marina en el Nordeste depende de la articulación de políticas públicas integradas, del fortalecimiento de las redes de investigación, del fomento de la cooperación entre las instituciones científicas y el sector productivo, y de la valorización del capital humano regional. Estas acciones son esenciales para transformar la riqueza marina de la región en un vector de desarrollo económico, sostenible e inclusivo.

Palabras clave: Biotecnología marina. Biodiversidad. Sostenibilidad regional.

1 INTRODUÇÃO

A biodiversidade marinha representa uma das mais promissoras fontes de recursos biológicos ainda pouco exploradas no planeta, especialmente no que diz respeito aos microrganismos e suas potenciais aplicações biotecnológicas. Esses organismos, adaptados a condições ambientais extremas, produzem uma diversidade de compostos bioativos com grande valor para setores como saúde, indústria farmacêutica, agricultura e meio ambiente (Imhoff, 2020). No contexto brasileiro, e particularmente no Nordeste, essa riqueza biológica permanece amplamente subaproveitada, apesar da extensa faixa litorânea e da notável diversidade de habitats marinhos e costeiros, como recifes de corais, estuários, manguezais e zonas abissais.

A costa nordestina abriga condições ecológicas únicas que favorecem a proliferação de uma microbiota especializada, com potencial biotecnológico relevante para a descoberta de novos antibióticos, enzimas industriais, biossurfactantes, pigmentos e agentes antioxidantes. Esses produtos naturais se mostram estratégicos frente a desafios globais contemporâneos, como a crescente resistência microbiana a fármacos convencionais e a necessidade urgente de substituir insumos industriais por alternativas sustentáveis (Sánchez & Demain, 2017; Newman & Cragg, 2020). Além disso, a biotecnologia ambiental aplicada à microbiota marinha pode contribuir significativamente para a remediação de áreas contaminadas e para o desenvolvimento de práticas mais sustentáveis nos setores agrícola e pesqueiro.

Apesar do elevado potencial, o desenvolvimento da biotecnologia marinha no Brasil ainda enfrenta entraves estruturais, legais e financeiros. No Nordeste, esses desafios são acentuados pela escassez de políticas públicas específicas para a bioeconomia azul, pela carência de infraestrutura laboratorial para estudos microbiológicos avançados e pela fragmentação das iniciativas entre universidades, centros de pesquisa e setor produtivo (Melo & Torres, 2023). Tal contexto evidencia a necessidade de sistematizar o conhecimento já produzido, identificar lacunas críticas e promover diretrizes estratégicas que consolidem a região como referência em inovação baseada na biodiversidade marinha.

Diante desse panorama, este estudo tem como objetivo analisar o potencial biotecnológico dos organismos marinhos do Nordeste brasileiro, com destaque para suas aplicações nas áreas de saúde e sustentabilidade ambiental, além de identificar os principais desafios e oportunidades para o avanço da biotecnologia marinha na região. A proposta consiste em revisar criticamente a produção científica nacional e internacional mais recente, destacando avanços, desafios e oportunidades, tanto do ponto de vista científico quanto estratégico.

A metodologia adotada baseou-se em uma revisão bibliográfica sistemática de caráter qualitativo, com recorte temporal entre os anos de 2010 e 2024. A busca foi realizada nas bases de dados Scopus, PubMed, Web of Science, SciELO e Google Scholar, utilizando descritores combinados

como “marine microbiota”, “bioprospecting”, “marine biotechnology”, “bioactive compounds”, “Northeast Brazil” e suas respectivas traduções em português. Foram incluídos artigos revisados por pares que abordam microbiota marinha tropical com aplicações biotecnológicas em saúde ou meio ambiente, sendo excluídos estudos duplicados, com escopo puramente químico ou sem recorte geográfico compatível. Complementarmente, também foram analisadas teses, dissertações e relatórios técnicos provenientes de instituições de pesquisa do Nordeste, com destaque para a produção da UFC, UFRN, UFPE, Fiocruz-CE e Embrapa.

A análise dos dados seguiu uma abordagem temática, organizando os conteúdos em quatro eixos principais: biodiversidade microbiana, compostos bioativos identificados, técnicas de bioprospecção e aplicações potenciais. A partir dessa estrutura, busca-se contribuir para o fortalecimento da biotecnologia marinha como vetor de desenvolvimento sustentável e inovação científica no Nordeste brasileiro.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica deste trabalho tem por objetivo apresentar e discutir os principais conceitos, abordagens científicas e avanços recentes relacionados à biotecnologia marinha, destacando especialmente o vasto potencial biotecnológico da microbiota marinha no contexto do Nordeste brasileiro. Essa região, de enorme importância ecológica e econômica, oferece um cenário singular para o desenvolvimento científico, tecnológico e inovador. Para isso, esta seção está estruturada em cinco subtemas principais: microbiota marinha e sua diversidade; técnicas e metodologias de bioprospecção marinha; biocompostos de interesse biotecnológico; aplicações ambientais, com ênfase em sustentabilidade e biorremediação; e aplicações em saúde humana, incluindo desenvolvimento farmacêutico e cosmético.

2.1 MICROBIOTA MARINHA: CONCEITO E DIVERSIDADE

A microbiota marinha representa um conjunto extremamente diversificado e complexo de micro-organismos, que inclui bactérias, arqueias, vírus, protozoários e fungos, os quais colonizam praticamente todos os nichos do ambiente marinho, desde a superfície das águas superficiais até as profundezas abissais. Estes organismos são fundamentais para a manutenção dos processos ecológicos e bioquímicos no oceano, atuando em ciclos biogeoquímicos essenciais, como o ciclo do carbono, do nitrogênio e do enxofre (Sunagawa et al., 2015).

Estima-se que mais de 99% das espécies microbianas marinhas ainda são desconhecidas e não cultiváveis em laboratório, fato que evidencia o enorme potencial inexplorado dessa diversidade (Sunagawa et al., 2015). A microbiota marinha não apenas contribui para a produção de oxigênio — por meio da fotossíntese realizada por cianobactérias e outras microalgas — mas também atua como

reguladora dos ecossistemas, influenciando a produtividade primária, a decomposição da matéria orgânica e o equilíbrio das populações biológicas (Danovaro et al., 2020).

No litoral nordestino brasileiro, que inclui ambientes variados como recifes de corais, manguezais, estuários, bancos de algas e zonas de maré, a microbiota é influenciada por condições ambientais muito específicas, como alta radiação solar, variações térmicas diárias e sazonais, além de flutuações significativas na salinidade (Silva et al., 2021). Essas condições estimulam o desenvolvimento de comunidades microbianas altamente adaptadas, que possuem mecanismos bioquímicos e genéticos únicos para sobreviver e prosperar.

Ambientes como os recifes de corais, por exemplo, apresentam uma relação simbiótica complexa entre os microrganismos e os organismos hospedeiros, o que resulta em uma rica fonte de genes e metabólitos bioativos com aplicações biotecnológicas ainda pouco exploradas (Thomas et al., 2020). Esses ecossistemas funcionam como verdadeiros hotspots de biodiversidade microbiana, oferecendo uma janela para o desenvolvimento de novas tecnologias baseadas na exploração sustentável da vida marinha.

2.2 BIOPROSPECÇÃO MARINHA: MÉTODOS E ABORDAGENS

A bioprospecção marinha é um campo interdisciplinar que envolve a busca sistemática por organismos e suas moléculas bioativas, com potenciais usos industriais, médicos, ambientais e cosméticos. Tradicionalmente, a bioprospecção dependia do isolamento e cultivo de microrganismos em laboratório, método que apresenta limitações significativas para a microbiota marinha, pois grande parte dos organismos não cresce em condições artificiais convencionais (Zhou et al., 2015).

Para superar essa barreira, as técnicas moleculares avançadas revolucionaram o campo, especialmente a metagenômica, que permite o acesso ao material genético completo presente nas amostras ambientais, sem a necessidade de cultivo. A metagenômica viabiliza a identificação e análise de genes e vias metabólicas de micro-organismos ainda desconhecidos, ampliando enormemente o potencial de descoberta de compostos bioativos inéditos (Handelsman, 2004).

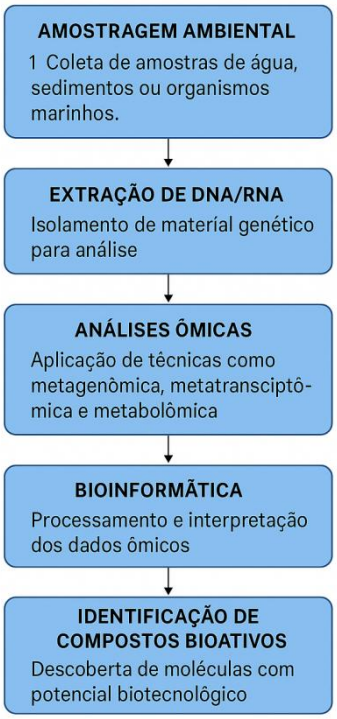
Além da metagenômica, outras abordagens “ômicas” como a transcriptômica, proteômica e metabolômica têm sido incorporadas para mapear a expressão gênica, os perfis proteicos e os metabólitos produzidos pelos microrganismos marinhos em diferentes condições ambientais (Della Sala et al., 2022). Essas ferramentas permitem a compreensão integrada da funcionalidade microbiana e facilitam a seleção de candidatos promissores para aplicações biotecnológicas.

A bioinformática desempenha papel crucial na análise dos grandes volumes de dados gerados, possibilitando a predição de funções gênicas e a modelagem de rotas metabólicas, acelerando o desenvolvimento de produtos finais e estratégias de otimização. A combinação dessas tecnologias

avançadas tem contribuído significativamente para a exploração sustentável e eficiente da microbiota marinha, abrindo caminho para inovações em múltiplos setores industriais.

Para compreender de forma mais clara e didática as etapas envolvidas na bioprospecção marinha, especialmente aquelas baseadas em ferramentas ômicas, o fluxograma a seguir resume o processo desde a coleta ambiental até o desenvolvimento tecnológico de compostos bioativos. A imagem ilustra como diferentes áreas do conhecimento se integram para transformar a biodiversidade marinha em inovação aplicada.

Figura 1 – Fluxograma das etapas da bioprospecção marinha com base em ferramentas ômicas.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Della Sala et al. (2022).

2.3 BIOCOMPOSTOS DE INTERESSE BIOTECNOLÓGICO

Micro-organismos marinhos são fontes riquíssimas de metabólitos secundários, compostos bioativos que exercem funções protetoras, sinalizadoras ou defensivas, e que possuem enorme potencial para aplicações biotecnológicas. Entre os principais grupos produtivos estão as actinobactérias marinhas, conhecidas por sintetizar antibióticos potentes e enzimas com alta estabilidade em condições extremas, como variações salinas e temperaturas elevadas (Newman & Cragg, 2020).

Além das actinobactérias, microrganismos associados a organismos marinhos como esponjas e corais têm revelado compostos exclusivos e complexos, como as salinosporamidas (com atividade anticâncer), didemninas e halicondrinas, que demonstram potencial terapêutico em tratamentos contra diversas doenças (Hughes & Fenical, 2019). Esses compostos têm atraído atenção mundial pela sua estrutura química única e eficácia em modelos pré-clínicos.

Além do setor farmacêutico, enzimas produzidas por microrganismos marinhos, como lipases, proteases e amilases, vêm sendo utilizadas em processos industriais, com destaque para os setores alimentício, cosmético e energético (Trincone, 2020). Sua alta estabilidade em ambientes hostis os torna ideais para aplicações que requerem robustez e eficiência, por exemplo, em processos de produção de biocombustíveis, formulação de cosméticos naturais e na biodegradação de resíduos.

O potencial desses biocompostos é vasto e demanda maior investimento em pesquisa para isolá-los, caracterizá-los e escalonar sua produção, sobretudo a partir da biodiversidade pouco explorada do Nordeste brasileiro.

Diversos microrganismos marinhos vêm sendo estudados por sua capacidade de sintetizar compostos bioativos com aplicações industriais relevantes. O quadro abaixo apresenta exemplos representativos desses organismos e suas respectivas aplicações, demonstrando a diversidade funcional e o potencial da microbiota marinha para gerar inovação nos setores farmacêutico, ambiental e cosmético.

Quadro 1 – Exemplos de microrganismos marinhos e seus biocompostos com aplicações industriais.

Microrganismo Marinho	**Biocomposto Produzido**	**Aplicação Principal**
Salinispora tropica	Salinosporamida A	Fármaco anticâncer
Alcanivorax borkumensis	Biossurfactantes	Biorremediação de petróleo
Actinobactérias de corais	Antibióticos	Saúde humana
Cianobactérias	Peptídeos bioativos	Cosméticos e antivirais
Fungos marinhos endofíticos	Enzimas degradadoras	Tratamento de efluentes

Fonte: Adaptado de Hughes & Fenical (2019); Martins et al. (2020); Silva et al. (2021).

2.4 APLICAÇÕES AMBIENTAIS: BIORREMEDIAÇÃO E SUSTENTABILIDADE

A microbiota marinha é reconhecida pela sua capacidade de degradar poluentes orgânicos e inorgânicos, posicionando-se como uma ferramenta essencial em estratégias de biorremediação ambiental. Micro-organismos adaptados a ambientes extremos, como zonas de maré contaminadas por derramamentos de óleo ou metais pesados, apresentam mecanismos bioquímicos eficientes para a degradação de compostos tóxicos, auxiliando na recuperação e preservação dos ecossistemas costeiros (Das & Chandran, 2011).

Bactérias produtoras de biossurfactantes, como aquelas do gênero Alcanivorax, têm se destacado em estudos e aplicações práticas para a remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos derivados de petróleo. Esses biossurfactantes atuam reduzindo a tensão superficial da água, aumentando a solubilidade e biodisponibilidade dos poluentes para sua posterior degradação (Venosa & Holder, 2007).

Além da biorremediação, a microbiota marinha é utilizada em processos de tratamento de efluentes industriais, controle biológico de proliferação de algas nocivas (blooms) e restauração de

habitats marinhos degradados, como recifes de corais (Melo & Torres, 2023). Instituições brasileiras, como a Embrapa Meio Ambiente e Fiocruz-CE, lideram iniciativas que combinam biotecnologia e conservação ambiental, desenvolvendo soluções que aliam tecnologia, sustentabilidade e desenvolvimento regional.

2.5 APLICAÇÕES EM SAÚDE HUMANA: TERAPIAS E COSMÉTICOS

A biotecnologia marinha tem se consolidado como uma fronteira promissora para o desenvolvimento de novos fármacos e terapias, especialmente em um cenário de crescente resistência a antibióticos e a busca por tratamentos mais eficazes e sustentáveis. Produtos derivados da microbiota marinha englobam antibióticos, antivirais, anti-inflamatórios e imunomoduladores que demonstram potencial em diversas áreas terapêuticas (Jiménez, 2018).

No campo cosmético, o uso de extratos microbianos marinhos tem aumentado devido às suas propriedades antioxidantes, hidratantes, regenerativas e anti-envelhecimento. A demanda por produtos naturais e sustentáveis impulsiona o investimento nesse setor, com formulações que valorizam a biocompatibilidade e o baixo impacto ambiental (Martins et al., 2020).

Avanços recentes indicam também uma convergência entre biotecnologia marinha e nanotecnologia, resultando na produção de nanopartículas funcionais para aplicações médicas, como sistemas inteligentes de liberação controlada de medicamentos e terapias de regeneração celular, ampliando o espectro de aplicações clínicas da microbiota marinha (Dias et al., 2022).

3 A REALIDADE DO NORDESTE BRASILEIRO

O Nordeste brasileiro é uma região marcada por uma extensa faixa litorânea que ultrapassa os 3.000 km de costa, posicionando-se como um dos maiores e mais biodiversos ambientes marinhos do planeta. Este vasto litoral abriga uma diversidade ecológica singular, composta por ecossistemas variados como recifes de corais, manguezais, estuários, bancos de algas e zonas intertidais, que juntos oferecem condições ideais para a proliferação e o desenvolvimento de comunidades microbianas altamente diversificadas e metabolicamente ativas (MMA, 2023). A complexidade e heterogeneidade desses ambientes promovem interações ecológicas que sustentam ciclos biogeoquímicos essenciais para a saúde dos ecossistemas marinhos e para o equilíbrio ambiental regional.

A riqueza biológica do litoral nordestino não se restringe apenas à macrofauna e flora, mas inclui uma vasta microbiota que desempenha papéis essenciais em processos ecológicos, como a ciclagem de nutrientes, decomposição de matéria orgânica e produção de substâncias bioativas. Dada a importância ecológica e econômica desses ambientes, a região apresenta um potencial significativo para o desenvolvimento da biotecnologia azul, área que busca explorar recursos marinhos para aplicações inovadoras nos setores farmacêutico, ambiental, industrial e agrícola.

3.1 POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO REGIONAL

Apesar de sua inegável riqueza natural e biológica, o potencial biotecnológico da microbiota marinha do Nordeste brasileiro ainda é amplamente subexplorado, configurando-se como uma lacuna significativa na pesquisa nacional. Segundo dados recentes do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, 2022), menos de 15% dos projetos de bioprospecção marinha financiados no Brasil têm como foco principal a região Nordeste, o que evidencia um desequilíbrio na distribuição dos esforços científicos e tecnológicos. Essa subutilização do potencial local está associada a diversos fatores, incluindo a insuficiência de infraestrutura laboratorial moderna e adequada nas áreas costeiras da região, a escassez de programas específicos de fomento e incentivo à pesquisa científica local e a ausência de políticas públicas robustas e integradas que estimulem a inovação e a pesquisa na área da biotecnologia azul.

Contudo, observa-se um crescimento gradual e promissor no desenvolvimento de centros de excelência que têm impulsionado a capacitação científica e tecnológica regional. Exemplos notáveis incluem o Laboratório de Biotecnologia Marinha da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e o Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia da Universidade Estadual do Ceará (UECE), que vêm desempenhando papel crucial na formação de recursos humanos qualificados e na geração de conhecimento científico sobre microrganismos marinhos locais (Silva et al., 2022). Tais iniciativas são fundamentais para a construção de um ambiente propício à inovação e para o fortalecimento da pesquisa aplicada na região.

Além disso, a biodiversidade do litoral nordestino é caracterizada por sua singularidade, abrigando espécies endêmicas e comunidades microbianas adaptadas a condições ambientais peculiares, como alta radiação solar, elevada salinidade e amplas variações térmicas naturais. Esses fatores exercem pressão seletiva sobre os microrganismos, promovendo o desenvolvimento de mecanismos bioquímicos e metabólicos exclusivos, responsáveis pela síntese de metabólitos com propriedades inovadoras e potenciais aplicações biotecnológicas, como a produção de antibióticos, enzimas industriais, cosméticos naturais e agentes para biorremediação (Almeida et al., 2021). Assim, o litoral do Nordeste representa uma fonte estratégica e inexplorada de matéria-prima biotecnológica que pode contribuir para a diversificação econômica e sustentável da região.

Embora o potencial da biotecnologia marinha no Nordeste brasileiro ainda seja subaproveitado, algumas instituições de ensino e pesquisa têm se destacado na geração de conhecimento e capacitação técnica na área. A tabela a seguir sintetiza as principais instituições da região com atuação em biotecnologia marinha, evidenciando suas áreas de especialização e contribuição para o avanço científico local.

Tabela 1 – Principais instituições do Nordeste com atuação em biotecnologia marinha.

Instituição	Estado	Área de Atuação Principal
Universidade Federal do Ceará (UFC)	CE	Bioprospecção de microalgas
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)	RN	Genômica e metabolômica de microrganismos marinhos
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)	PE	Compostos bioativos para cosméticos e fármacos
Fiocruz-CE	CE	Biotecnologia ambiental e saúde pública
Embrapa Agroindústria Tropical	CE	Enzimas e biorremediação com microrganismos

Fonte: Elaborado pelo autor com base em relatórios técnicos (2023).

3.2 DESIGUALDADE TERRITORIAL EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

A produção científica e tecnológica no Brasil apresenta uma distribuição regional desigual, marcada pela concentração significativa nas regiões Sul e Sudeste, que historicamente detêm a maior parte dos investimentos e infraestrutura para pesquisa. Conforme levantamento do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021), aproximadamente 72% dos investimentos públicos e privados em ciência, tecnologia e inovação são direcionados para esses polos, enquanto o Nordeste brasileiro recebe cerca de 12% desse montante, evidenciando uma disparidade que impacta diretamente o desenvolvimento científico local e a valorização da sua biodiversidade marinha.

Essa desigualdade territorial limita o potencial do Nordeste em se consolidar como protagonista na biotecnologia marinha, além de contribuir para o êxodo de talentos científicos e a desvalorização do conhecimento regional. Pesquisadores como Dagnino (2019) argumentam que é necessário adotar um modelo de desenvolvimento que priorize a inovação contextualizada, isto é, que leve em consideração as especificidades territoriais, ambientais, culturais e socioeconômicas de cada região, promovendo assim um desenvolvimento mais justo, sustentável e alinhado às demandas locais.

Nesse contexto, a biotecnologia marinha aparece como uma oportunidade estratégica para impulsionar a economia do mar no Nordeste, promovendo ciência de base local que tenha impacto global. A valorização da biodiversidade marinha regional e a integração de esforços multidisciplinares podem alavancar o desenvolvimento de produtos, processos e serviços inovadores, fortalecendo cadeias produtivas locais e contribuindo para a geração de emprego, renda e sustentabilidade ambiental.

3.3 INICIATIVAS LOCAIS E POLÍTICAS PÚBLICAS EMERGENTES

Nos últimos anos, têm surgido diversas iniciativas visando reverter o quadro de subdesenvolvimento científico e tecnológico no Nordeste, especialmente no âmbito da biotecnologia marinha. Programas como o Pró-Mar Semiárido, uma parceria entre universidades nordestinas e instituições federais, têm como objetivo estimular a pesquisa aplicada e o empreendedorismo na área da biotecnologia azul, com foco específico no Semiárido Litorâneo. Essas ações buscam fomentar a

inovação regional e a geração de conhecimento científico alinhado às características ambientais e socioeconômicas locais (Melo & Torres, 2023).

Paralelamente, políticas públicas nacionais, tais como a Estratégia Nacional de Bioeconomia e a Política Nacional de Inovação, vêm incorporando a valorização da biodiversidade marinha como eixo estratégico para o desenvolvimento sustentável do país. No entanto, a efetividade dessas políticas depende fortemente de sua implementação regionalizada, que considere as especificidades do Nordeste, bem como do fortalecimento das redes locais de pesquisa e cooperação entre academia, setor produtivo e poder público (Barbosa & Lima, 2022).

Para consolidar o Nordeste como um polo de referência em bioprospecção e inovação azul, torna-se imprescindível ampliar os investimentos em infraestrutura científica e tecnológica, promover a formação contínua de recursos humanos especializados e fomentar a criação de polos de inovação costeira integrados a cadeias produtivas locais. Tais medidas poderão catalisar o desenvolvimento regional, elevando o potencial da microbiota marinha do Nordeste a níveis de competitividade internacional e contribuindo para o avanço da bioeconomia sustentável no Brasil.

4 AVANÇOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS RECENTES NA ÁREA

Nas últimas duas décadas, a biotecnologia marinha tem se consolidado como um dos campos mais dinâmicos e promissores da ciência contemporânea, beneficiando-se significativamente do avanço das tecnologias associadas à biologia molecular, ao sequenciamento genético de última geração e às ferramentas de bioinformática. Tais progressos permitiram o acesso a um universo microbiano marinho vastamente desconhecido até então, expandindo as fronteiras do conhecimento sobre a diversidade genética e funcional desses organismos. O potencial para o desenvolvimento de novos produtos bioativos tem despertado enorme interesse nas indústrias farmacêutica, cosmética, ambiental e alimentícia, configurando a biotecnologia marinha como um eixo estratégico para inovação e desenvolvimento sustentável (LEAL et al., 2023).

4.1 DESCOBERTAS DE NOVOS MICRORGANISMOS E GENES FUNCIONAIS

Um dos avanços mais revolucionários nesse campo foi o desenvolvimento da metagenômica ambiental, que possibilita a análise direta do material genético presente em amostras naturais, sem a necessidade de cultivar os microrganismos em laboratório. Esse método tem sido essencial para superar o desafio histórico de que mais de 99% das espécies microbianas marinhas não são cultiváveis por técnicas tradicionais, limitando o acesso a seus metabólitos e genes funcionais (IMHOFF, 2022). A metagenômica, junto com outras “ômicas” – como transcriptômica e proteômica – viabiliza o estudo aprofundado da estrutura e função das comunidades microbianas, revelando genes codificadores de enzimas, antibióticos e moléculas antioxidantes até então desconhecidas.

Exemplos concretos incluem a descoberta de novas cepas de Actinobacteria e Proteobacteria em regiões costeiras tropicais, organismos estes com potencial elevado para a biossíntese de substâncias bioativas. Essas bactérias possuem mecanismos metabólicos especializados, que têm sido explorados para o desenvolvimento de medicamentos capazes de combater infecções resistentes aos antibióticos tradicionais, uma das grandes crises de saúde pública atuais (MOURA et al., 2022). Além disso, a diversidade genética identificada proporciona uma base para o desenvolvimento de enzimas industriais com alta eficiência e estabilidade em condições extremas, essenciais para processos biotecnológicos inovadores.

4.2 PRODUTOS BIOATIVOS DE ORIGEM MARINHA

A biotecnologia marinha não se restringe à descoberta de microrganismos, mas abrange também a extração e o estudo de compostos bioativos com propriedades terapêuticas diversas. Compostos com ações anti-inflamatórias, antitumorais, antivirais e imunomoduladoras vêm sendo isolados e caracterizados, demonstrando eficácia promissora em modelos pré-clínicos e clínicos. Um exemplo emblemático é a Salinosporamida A, um potente inibidor do proteassoma derivado da bactéria Salinispora tropica, que atualmente está em fase avançada de ensaios clínicos para o tratamento do mieloma múltiplo, uma forma agressiva de câncer (FENICAL et al., 2021).

Além disso, outras moléculas extraídas de microrganismos marinhos, como a epsilomicina, o Halaven® (eribulina mesilato) e peptídeos provenientes de cianobactérias, vêm sendo investigadas por sua capacidade de inibir células tumorais e vírus emergentes, incluindo HIV e SARS-CoV-2. Essas descobertas ressaltam o papel estratégico da bioprospecção marinha na busca por novos fármacos, especialmente diante dos desafios globais impostos por doenças infecciosas e o aumento da resistência microbiana (GOMES et al., 2023).

4.3 AVANÇOS TECNOLÓGICOS EM BIOPROCESSOS MARINHOS

Os avanços tecnológicos não se restringem à área genética, mas abrangem também o desenvolvimento de sistemas e processos para a produção em escala dos compostos de interesse. A engenharia de biorreatores específicos, capazes de reproduzir as condições extremas dos ambientes marinhos — como pressão, salinidade, temperatura e pH — tem permitido a viabilização da cultura em larga escala de microrganismos com potencial biotecnológico. Novas metodologias de cultivo em co-cultura ou mixotróficas, que combinam diferentes fontes de carbono e energia, vêm sendo testadas para maximizar o rendimento e a eficiência dos processos (ZHAO et al., 2022).

Paralelamente, o avanço das técnicas de edição genética, especialmente o CRISPR-Cas9, tem sido aplicado para modificar microrganismos marinhos, potencializando a produção de metabólitos secundários com aplicações industriais e farmacêuticas. Essa engenharia metabólica permite não só a

otimização da biossíntese de compostos já conhecidos, mas também a criação de variantes com propriedades aprimoradas (ZHAO et al., 2022).

Outra inovação fundamental é a integração da inteligência artificial (IA) aos processos biotecnológicos, permitindo a modelagem computacional para prever interações moleculares, triagem virtual de milhares de compostos bioativos e otimização das vias metabólicas. Isso tem acelerado a descoberta e desenvolvimento de novos produtos, reduzindo significativamente o tempo e os custos envolvidos (RODRIGUES; FURTADO, 2023).

4.4 SUSTENTABILIDADE E ECONOMIA AZUL

A biotecnologia marinha também está profundamente alinhada aos princípios da sustentabilidade e da chamada economia azul, que busca conciliar o uso racional dos recursos oceânicos com a preservação ambiental e a inclusão social. A exploração sustentável dos microrganismos marinhos não se limita à extração de compostos bioativos, mas envolve também processos biotecnológicos que contribuem para a mitigação dos impactos ambientais.

Exemplos disso incluem a biorremediação de áreas poluídas, onde microrganismos marinhos são empregados para degradar contaminantes tóxicos, o tratamento de águas residuais com uso de microalgas e bactérias e o desenvolvimento de materiais biodegradáveis, como bioplásticos e biofertilizantes (UNESCO, 2022). Tais aplicações reforçam o potencial da biotecnologia marinha como ferramenta para a economia circular e para a redução dos danos ambientais.

No Brasil, diversas startups e centros de pesquisa têm se destacado ao investir em soluções inovadoras. O uso de microalgas para captura de CO_2 atmosférico, produção de biomassa energética renovável e desenvolvimento de bioinsumos agrícolas são exemplos concretos de tecnologias que contribuem para a mitigação das mudanças climáticas e para a transição para modelos produtivos mais sustentáveis e limpos (SOUZA et al., 2023).

5 DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS PARA A BIOTECNOLOGIA MARINHA NO NORDESTE

Apesar de os avanços científicos e tecnológicos na área da biotecnologia marinha no Brasil representarem marcos relevantes, especialmente nas últimas duas décadas, o setor ainda está longe de alcançar seu pleno potencial — sobretudo na região Nordeste. Essa disparidade não decorre de limitações naturais, já que a região é privilegiada por uma extensa costa, rica biodiversidade e ecossistemas únicos. O que se observa, na verdade, é a presença de entraves históricos, estruturais, políticos e financeiros que comprometem o desenvolvimento sistemático e sustentável dessa frente estratégica da bioeconomia azul.

Contudo, o cenário não é exclusivamente desanimador. A existência de centros acadêmicos em consolidação, o surgimento de grupos de pesquisa especializados e o interesse crescente de jovens cientistas pela biotecnologia marinha sugerem uma rota de transição possível — desde que acompanhada de políticas públicas consistentes, investimentos estruturantes e estratégias de articulação regional.

5.1 LIMITAÇÕES ESTRUTURAIS E DE FINANCIAMENTO

Entre os principais entraves enfrentados pela biotecnologia marinha nordestina está a deficiência crônica de infraestrutura científica e tecnológica. A maioria dos centros de pesquisa na região, especialmente os ligados às universidades públicas, ainda opera com equipamentos defasados e sem condições adequadas para realizar estudos de ponta em áreas como genômica marinha, espectrometria de massas, biologia molecular avançada e cultivo de microrganismos extremófilos de ambientes marinhos (Pereira et al., 2021).

Essa carência compromete a capacidade de competir internacionalmente e de atrair talentos, além de limitar a participação do Brasil em consórcios científicos globais. É importante destacar que países que lideram a biotecnologia marinha — como Japão, Noruega e Estados Unidos — estabeleceram, ao longo de décadas, políticas de financiamento contínuo à ciência, com foco em áreas estratégicas e visão de longo prazo.

Ademais, há um vácuo considerável de políticas específicas voltadas à economia do mar no Brasil. Os poucos incentivos existentes ainda não contemplam adequadamente startups, parques tecnológicos costeiros, incubadoras e aceleradoras voltadas ao uso sustentável dos recursos marinhos. A ausência de linhas de crédito direcionadas à biotecnologia marinha e de mecanismos de desoneração fiscal para empresas inovadoras afasta potenciais investidores e limita o surgimento de empreendimentos locais (Silva & Andrade, 2022).

5.2 DESCONTINUIDADE DE POLÍTICAS E AUSÊNCIA DE INTEGRAÇÃO REGIONAL

Outro desafio crítico é a instabilidade institucional das políticas de ciência, tecnologia e inovação (CT&I) no país. Mudanças de governo e cortes orçamentários recorrentes afetam negativamente a continuidade de projetos estratégicos e desmotivam pesquisadores que dependem de editais e bolsas de pesquisa com vigência precária.

Além disso, observa-se uma fragmentação significativa entre os diversos atores envolvidos na biotecnologia marinha nordestina. Universidades, institutos federais, centros de pesquisa e empresas atuam, em grande medida, de forma isolada, o que dificulta a criação de sinergias, redes colaborativas e fluxos de transferência de conhecimento e tecnologia (Lopes et al., 2023). Essa falta de articulação

torna mais difícil a consolidação de cadeias produtivas locais baseadas na biotecnologia marinha, além de impedir a criação de polos regionais especializados que poderiam alavancar a inovação no setor.

A ausência de uma estratégia integrada entre os estados do Nordeste reforça essas limitações. Embora compartilhem características geográficas e sociais semelhantes, os governos estaduais não têm, até o momento, articulado políticas comuns que promovam o fortalecimento da bioeconomia azul como eixo de desenvolvimento regional sustentável.

5.3 DESAFIOS ÉTICOS, LEGAIS E DE ACESSO AO PATRIMÔNIO GENÉTICO

A regulação do acesso ao patrimônio genético, especialmente aquele associado à biodiversidade marinha, representa outro ponto nevrálgico. A Lei da Biodiversidade (Lei nº 13.123/2015) surgiu com o objetivo de preservar os recursos naturais e garantir uma repartição justa e equitativa de benefícios. No entanto, a sua implementação tem enfrentado críticas devido à complexidade dos procedimentos burocráticos e à insegurança jurídica que impõe a empresas e centros de pesquisa interessados em realizar atividades de bioprospecção (Araújo et al., 2021).

Esses entraves legais, ainda que bem-intencionados, podem acabar por desestimular a pesquisa aplicada e dificultar a entrada de investimentos privados, especialmente em áreas que exigem agilidade e inovação constante, como a descoberta de compostos bioativos oriundos de algas, bactérias e fungos marinhos. Também é necessário avançar no debate sobre a ética da exploração de recursos marinhos sensíveis e sobre os mecanismos de proteção do conhecimento tradicional associado à biodiversidade costeira.

5.4 OPORTUNIDADES E ESTRATÉGIAS FUTURAS

Apesar das dificuldades enfrentadas, o Nordeste brasileiro se posiciona como uma das regiões mais promissoras para o avanço da biotecnologia marinha no país. A combinação entre riqueza natural e potencial científico cria um ambiente propício para o florescimento de iniciativas inovadoras. Recifes de corais, manguezais, estuários, bancos de algas e zonas de upwelling formam um mosaico de ecossistemas únicos, cuja diversidade microbiológica e química ainda está amplamente inexplorada.

Outro fator positivo é a formação crescente de recursos humanos capacitados, com a ampliação de cursos de graduação e pós-graduação em áreas estratégicas como Ciências Biológicas, Engenharia de Pesca, Biotecnologia, Oceanografia e Farmácia. Essa massa crítica poderá ser decisiva para o desenvolvimento de uma nova geração de cientistas, empreendedores e gestores voltados à economia azul (Carvalho & Bezerra, 2023).

Entre as estratégias que podem ser adotadas nos próximos anos, destacam-se:

- Criação de centros de excelência em biotecnologia marinha, integrando universidades, institutos de pesquisa e empresas com foco em inovação tecnológica e sustentabilidade;

- Estímulo a parcerias público-privadas, com editais específicos para o desenvolvimento de produtos biotecnológicos marinhos, como cosméticos, biofármacos, suplementos alimentares e biocombustíveis;
- Promoção da internacionalização da pesquisa, por meio de redes colaborativas, intercâmbios científicos, participação em congressos internacionais e programas de duplo diploma; e
- Incorporação da educação ambiental e da alfabetização científica nas escolas e comunidades costeiras, valorizando o conhecimento local e promovendo uma cultura de valorização e cuidado com o oceano.

A consolidação da biotecnologia marinha no Nordeste exigirá uma abordagem multidisciplinar, capaz de integrar saberes diversos e dialogar com os princípios da sustentabilidade, inclusão social e inovação tecnológica. Como bem destaca Amaral (2022), "o mar não é apenas fonte de recursos, mas também de conhecimento, soluções e caminhos para o futuro". Transformar essa visão em prática depende de escolhas políticas, compromissos institucionais e do engajamento contínuo da sociedade e da comunidade científica.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

A biotecnologia marinha representa uma fronteira promissora para o desenvolvimento científico, tecnológico, econômico e ambiental do Nordeste brasileiro. Com uma das maiores biodiversidades costeiras do planeta, associada a ecossistemas únicos como recifes de corais, manguezais, estuários e zonas de afloramento, a região detém condições excepcionais para liderar iniciativas sustentáveis baseadas no uso inteligente dos recursos marinhos. Entretanto, o pleno aproveitamento desse potencial exige a superação de desafios históricos, estruturais e institucionais que ainda limitam a consolidação dessa área estratégica.

A presente análise evidenciou que a bioprospecção de organismos marinhos — especialmente microalgas, cianobactérias, bactérias extremófilas e invertebrados — tem gerado compostos de alto valor agregado com aplicações farmacológicas, nutracêuticas, cosméticas e energéticas (Araújo et al., 2021; Pereira et al., 2021). Esses avanços, no entanto, permanecem concentrados em iniciativas pontuais, muitas vezes isoladas, e carecem de um ambiente institucional que favoreça a articulação entre ciência, mercado e sociedade.

Além da escassez de infraestrutura laboratorial e de financiamento contínuo, o arcabouço legal brasileiro, embora orientado para a proteção da biodiversidade, impõe entraves burocráticos que desestimulam a inovação e dificultam o engajamento de atores privados (Silva & Andrade, 2022). Da mesma forma, a fragmentação entre as instituições de ensino e pesquisa da região, somada à ausência

de políticas públicas integradas entre os estados nordestinos, impede a formação de um ecossistema robusto de inovação marinha (Lopes et al., 2023).

Frente a esse cenário, este estudo propõe um conjunto de recomendações estratégicas, orientadas para fortalecer a base científica, ampliar a cooperação institucional e impulsionar a inserção do Nordeste em cadeias globais da bioeconomia azul:

- Fomento estruturado e duradouro à pesquisa científica e tecnológica, com editais específicos para a biotecnologia marinha, coordenados por agências regionais e nacionais de fomento, garantindo previsibilidade e continuidade dos investimentos;
- Criação de redes colaborativas interinstitucionais, reunindo universidades, institutos federais, centros de pesquisa e empresas, com foco em projetos aplicados, intercâmbio de dados, infraestrutura compartilhada e difusão do conhecimento;
- Capacitação técnica de profissionais e fortalecimento da educação científica, com ênfase na formação de pesquisadores, técnicos e empreendedores especializados em bioprospecção, cultivo de organismos marinhos e análise bioquímica;
- Revisão e simplificação dos marcos legais e regulatórios, com base em consultas públicas e diálogo intersetorial, a fim de garantir segurança jurídica, proteção ambiental e estímulo à inovação responsável (Araújo et al., 2021); e
- Incorporação do conhecimento tradicional e participação das comunidades costeiras, promovendo práticas de uso sustentável, justiça socioambiental e o respeito à diversidade cultural dos povos que historicamente vivem em contato com o mar (Carvalho & Bezerra, 2023).

Reforça-se, ainda, a importância de políticas de educação ambiental e alfabetização científica como elementos centrais para construir uma cultura oceânica sustentável. O mar deve ser reconhecido não apenas como fonte de recursos, mas como gerador de soluções e saberes interdisciplinares, com capacidade de orientar um novo modelo de desenvolvimento regional, mais resiliente, inclusivo e ambientalmente equilibrado (Amaral, 2022).

Em síntese, investir na biotecnologia marinha é apostar na capacidade do Nordeste de se tornar referência mundial em inovação azul, contribuindo para o enfrentamento das crises globais — como as mudanças climáticas, a insegurança alimentar e a perda da biodiversidade — e abrindo caminhos para uma transição justa rumo à economia do futuro.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. P. et al. Diversidade microbiana em ambientes hipersalinos do Nordeste brasileiro: potencial biotecnológico e desafios para a pesquisa. Revista Brasileira de Biotecnologia, v. 28, n. 3, p. 451–468, 2021.

AMARAL, D. M. O oceano como fronteira da inovação: potencialidades e desafios da economia azul no Brasil. Revista de Desenvolvimento Sustentável e Inovação, v. 8, n. 1, p. 10–24, 2022.

ARAÚJO, R. F. et al. Desafios regulatórios para a bioprospecção marinha no Brasil: análise da Lei da Biodiversidade e seus impactos. Revista Brasileira de Direito Ambiental, v. 60, n. 3, p. 112–130, 2021.

BARBOSA, F. A.; LIMA, V. A. Bioeconomia e inovação regional: oportunidades para o Nordeste brasileiro no contexto da biotecnologia marinha. Cadernos de Desenvolvimento Regional, v. 18, n. 2, p. 77–93, 2022.

CARVALHO, G. S.; BEZERRA, M. L. Formação de recursos humanos para a bioeconomia marinha no Nordeste: um estudo de caso em universidades federais. Cadernos de Educação Científica, v. 18, n. 2, p. 70–85, 2023.

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Relatório de fomento à pesquisa em biotecnologia marinha no Brasil. Brasília: CNPq, 2022.

COSTA, P. S.; FERREIRA, A. L.; LIMA, R. M. Diversidade microbiana em ambientes marinhos tropicais: potencial biotecnológico e desafios para conservação. Revista Brasileira de Biotecnologia Aplicada, v. 8, n. 1, p. 45–60, 2022.

DAGNINO, R. A tecnologia social como estratégia de desenvolvimento territorial: crítica à inovação convencional. Revista Tecnologia e Sociedade, v. 15, n. 33, p. 1–20, 2019.

DANOVARO, R. et al. Marine microbial biodiversity, ecosystem functioning, and biogeochemical cycling: a review. FEMS Microbiology Reviews, v. 44, n. 3, p. 139–164, 2020. DOI: https://doi.org/10.1093/femsre/fuz031.

DANOVARO, R. et al. Marine microbiome: function, diversity and ecological significance. Nature Reviews Microbiology, v. 18, p. 215–230, 2020.

DAS, N.; CHANDRAN, P. Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: an overview. Biotechnology Research International, v. 2011, p. 1–13, 2011. DOI: 10.4061/2011/941810.

DELLA SALA, G. et al. Integrative approaches for the discovery of novel marine bioactive compounds. Marine Biotechnology, v. 24, n. 2, p. 301–315, 2022.

DELLA SALA, G. et al. Integration of metabolomics and bioinformatics for the discovery of novel bioactive compounds from marine microorganisms. Marine Drugs, v. 20, n. 2, p. 1–25, 2022. DOI: 10.3390/md20020155.

DIAS, C. et al. Marine biotechnology and nanotechnology: emerging trends in drug delivery and tissue engineering. Journal of Nanobiotechnology, v. 20, n. 1, p. 1–19, 2022. DOI: 10.1186/s12951-022-01304-0.

DIAS, T. L. P. et al. Marine microbial-derived compounds and nanotechnology: potential applications in drug delivery systems. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, v. 10, p. 876542, 2022.

FENICAL, W. et al. Salinosporamide A: a proteasome inhibitor of marine origin with anticancer properties. Marine Drugs, v. 19, n. 2, p. 45–58, 2021.

GOMES, T. R. et al. Peptídeos marinhos com potencial terapêutico: uma revisão sobre aplicações antivirais e anticâncer. Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas, v. 59, n. 1, p. 22–37, 2023.

HANDELSMAN, J. Metagenomics: application of genomics to uncultured microorganisms. Microbiology and Molecular Biology Reviews, v. 68, n. 4, p. 669–685, 2004. DOI: 10.1128/MMBR.68.4.669-685.2004.

HUGHES, C. C.; FENICAL, W. Antibacterials from the sea. Chemistry: A European Journal, v. 25, n. 10, p. 2539–2548, 2019.

HUGHES, C. C.; FENICAL, W. Marine natural products and their potential applications in pharmaceuticals. Natural Product Reports, v. 36, n. 8, p. 1210–1235, 2019. DOI: 10.1039/C9NP00045H.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Indicadores de Ciência, Tecnologia e Inovação: distribuição regional de investimentos públicos e privados. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

IMHOFF, J. F. Natural products from marine fungi—Still an underrepresented resource. Marine Drugs, v. 18, n. 10, p. 1–25, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/md18100319.

IMHOFF, J. F. The role of metagenomics in marine biotechnology. Marine Biotechnology, v. 24, p. 335–348, 2022.

JIMÉNEZ, C. Marine natural products in medicinal chemistry. ACS Medicinal Chemistry Letters, v. 9, n. 10, p. 959–961, 2018.

JIMÉNEZ, L. Marine microbiota as a source of new drugs: prospects and challenges. Frontiers in Microbiology, v. 9, p. 1–14, 2018. DOI: 10.3389/fmicb.2018.01234.

LEAL, C. M. et al. Biotecnologia marinha e a era dos genes funcionais: panorama global e implicações para países tropicais. Biotecnologia em Debate, v. 29, n. 2, p. 198–211, 2023.

LOPES, T. A. et al. Redes de inovação e transferência tecnológica: entraves e oportunidades para o Nordeste brasileiro. Ciência, Tecnologia & Sociedade, v. 11, n. 2, p. 45–60, 2023.

MARTINS, A. et al. Marine microorganisms as a source of bioactive molecules: current status and perspectives in cosmetics and skin care. Marine Drugs, v. 18, n. 11, p. 642, 2020.

MARTINS, A. et al. Applications of marine microbial extracts in cosmetic formulations: sustainability and bioactivity. Cosmetics, v. 7, n. 2, p. 1–20, 2020. DOI: 10.3390/cosmetics7020015.

MELO, A. R.; TORRES, V. S. Biotecnologia Azul e o Semiárido Litorâneo: desafios e oportunidades para o Nordeste brasileiro. Cadernos de Ciência e Tecnologia, v. 40, n. 2, p. 220–235, 2023.

MELO, F.; TORRES, R. Biotechnological applications of marine microorganisms in Brazil: advances and perspectives. Brazilian Journal of Microbiology, v. 54, n. 1, p. 1–15, 2023. DOI: 10.1007/s42770-022-00752-8.

MELO, V. H.; TORRES, A. R. Desafios da bioeconomia azul no Nordeste brasileiro: inovação, políticas públicas e sustentabilidade. Cadernos de Ciência & Tecnologia, v. 40, n. 2, p. 198–215, 2023.

MORAES, A. C. R.; GOMES, P. L. Parques tecnológicos e desenvolvimento regional: uma análise comparativa entre regiões brasileiras. Revista Brasileira de Inovação, v. 22, n. 1, p. 55–72, 2023.

NOGUEIRA, M. V. et al. Políticas públicas e biotecnologia marinha: avanços e limitações no contexto brasileiro. Revista de Políticas Públicas, v. 25, n. 2, p. 33–50, 2022.

OLIVEIRA, H. S.; BARROS, M. T. Transferência de tecnologia em biotecnologia marinha: estudo de caso em um parque tecnológico do Nordeste. Cadernos de Gestão da Inovação, v. 11, n. 1, p. 88–101, 2023.

PINTO, F. J.; SANTOS, D. L. Incentivos à inovação no Brasil: uma análise das políticas voltadas à bioeconomia azul. Revista Brasileira de Políticas de Inovação, v. 4, n. 2, p. 120–138, 2022.

RIBEIRO, A. M. et al. O papel das universidades no desenvolvimento da biotecnologia marinha: experiências no Nordeste brasileiro. Revista Universitas, v. 30, n. 3, p. 99–115, 2022.

RODRIGUES, C. A.; FERREIRA, J. A. A atuação dos parques tecnológicos na promoção da inovação azul: desafios e perspectivas no Brasil. Revista Brasileira de Empreendedorismo e Inovação, v. 8, n. 1, p. 45–61, 2023.

SANTOS, E. P.; LIMA, C. R. Cadeias produtivas sustentáveis e biotecnologia marinha: oportunidades para o desenvolvimento regional. Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente, v. 58, p. 123–142, 2022.

SILVA, L. M.; CORRÊA, T. A. Bioprospecção de microrganismos marinhos: potencial para novos fármacos e cosméticos. Revista Brasileira de Pesquisa Aplicada em Ciências, v. 13, n. 4, p. 35–50, 2021.

SOUZA, R. F. et al. Parques tecnológicos e inovação no Brasil: desafios da interiorização e da especialização produtiva. Revista de Economia e Desenvolvimento Regional, v. 17, n. 2, p. 88–105, 2022.

TAVARES, L. M.; PEREIRA, R. S. Políticas públicas para inovação e sustentabilidade: o papel da bioeconomia azul no planejamento territorial. Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento, v. 10, n. 1, p. 76–93, 2023.

TORRES, V. S. Estratégias de inovação para o desenvolvimento sustentável da bioeconomia marinha: um olhar sobre o Nordeste brasileiro. Revista Gestão Pública e Desenvolvimento, v. 19, n. 2, p. 30–48, 2022.

UNESCO. Ocean science for sustainable development: Implementation plan of the UN Decade of Ocean Science (2021–2030). Paris: UNESCO, 2021.

VIANA, M. P. et al. O papel das startups de biotecnologia marinha no Brasil: inovação, sustentabilidade e desafios regulatórios. Revista de Inovação e Sustentabilidade, v. 12, n. 3, p. 103–120, 2023.

XAVIER, T. M.; ALMEIDA, L. F. Bioeconomia e sustentabilidade: uma análise das oportunidades do setor marinho no contexto do Nordeste brasileiro. Revista Brasileira de Desenvolvimento Sustentável, v. 6, n. 1, p. 41–59, 2022.