

III SPDE Seminário de Pesquisa e Desenvolvimento

*O futuro sustentável da indústria:
encontro de pesquisadores do
ecossistema de pesquisa do
Rio de Janeiro*



Ficha Catalográfica

S471 Seminário de Pesquisa e Desenvolvimento (3. : 2025 : Rio de Janeiro)
III SPDE Seminário de Pesquisa e Desenvolvimento : o futuro sustentável da indústria : encontro de pesquisadores do ecossistema de pesquisa do Rio de Janeiro / Firjan SENAI SESI. – Rio de Janeiro: [s.n], 2026.
71 p. : il., color. – (Estudos e Pesquisas) (Anais eletrônicos)

Reúne doze artigos resumo apresentados no III SPDE, realizado em junho de 2025, de forma integrada à I Conferência de Pesquisa e Desenvolvimento Industrial.

Inclui bibliografia

1. Desenvolvimento tecnológico. 2. Inovação tecnológica. 3. Indústria.
4. Rio de Janeiro. I. Firjan SENAI. II. Firjan SESI. III. Título.

CDD 303.483

Firjan – Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro

Presidente

Luiz César Caetano

1º Vice-Presidente Firjan

Carlos Erane de Aguiar

2º Vice-Presidente Firjan

Henrique Antônio Nora Oliveira Lima Junior

1º Vice-Presidente CIRJ

Isadora Landau Remy

2º Vice-Presidente CIRJ

Antonio Carlos Vilela

Diretora de Gestão de Pessoas, Diversidade e Produtividade

Adriana Torres

Diretor Executivo SESI SENAI

Alexandre dos Reis

Diretora de Compliance e Jurídico

Gisela Pimenta Gadelha

Diretora de Finanças e Serviços Corporativos

Luciana Costa M. de Sá

Diretor de Competitividade Industrial, Inovação Empresarial e Comunicação Corporativa

Maurício Fontenelle

Diretor de Educação e Cultura

Vinícius Cardoso

CONTEÚDO TÉCNICO

GERÊNCIA REGIONAL DE PESQUISA E SERVIÇOS TECNOLÓGICOS

Gerente Regional de Pesquisa e Serviços Tecnológicos

Carla Giordano

Gerente de Gestão Tecnológica

Daniel de Salles e Silva

Coordenadora da Divisão do Núcleo de Inovação Tecnológica

Gabriela Maria Padilha

Especialista em Gestão Tecnológica

Raquel Coelho Reis

Especialista em Gestão Tecnológica

Thiago Santiago Gomes

Equipe de apoio

Alan da Cruz Ananias

Anael Viana Pinto Alberto

Antonio Augusto Fidalgo Neto

Bruno Lopes Xavier

Damian Horacio Jose Gomez

Eric Cardona Romani

Erick Lorenzato Ferreira Vianna

Fabiana Pereira Coelho

Felipe Rebelo Lopes

Florence Vidal Perfeito

Giovanni Bressiani Pedroso

Helder Cerqueira Gonzalez

Jana Pereira Chaves

Joao Silveira Moledo Gesto

Juliana Mendonça C. Marinho Monteiro

Laert Ferreira da Silva Neto

Leon de Franca Nascimento

Lílian R. Lima Gonçalves

Luiz Gustavo Cardoso Maria

Marcos Vinicius Miranda Mesquita

Paulo Roberto Furio

Rafael de Souza Leal Malta

Ricardo Marques Diniz

Rubens Lincoln Santana Blazutti Marçal

Talita Goulart da Silva

Tatiana de F. M. Dunshee de Abranches

Victor Gabriel de Paula Saide

Weslei Costa da Silva

PROJETO GRÁFICO

GERÊNCIA GERAL DE REPUTAÇÃO E COMUNICAÇÃO

Gerente Geral de Reputação e Comunicação

Luiz Phillipe Steenhagen Blower

Gerente de Comunicação Corporativa e Eventos

Amanda Zarife

Gerente de Publicidade e Marca

Fernanda Marino

Coordenador de Gestão da Reputação e Inteligência de Dados

Eduardo Baesso

Equipe Técnica

Clara Marques

Lívia Brandão

FEV. 2026

www.firjan.com.br

Av. Graça Aranha, 1
Centro, Rio de Janeiro

Sumário

MENSAGEM DA GESTÃO	5
APRESENTAÇÃO	6
ARTIGOS-RESUMO: PESQUISAS EM TECNOLOGIAS DE QUÍMICAS APLICADAS À INDÚSTRIA	7
Desenvolvimento de um protótipo para captura de CO ₂ direta do ar.....	8
<i>EstAlgiário</i> : sistema inteligente de automatização de dados cromatográficos.....	12
Projeto Sig@s Maricás: integrando dados de biodiversidade e geotecnologias na gestão sustentável das Ilhas Maricás - RJ.....	17
Projeto Regenera Guará: como a restauração de manguezais está associada à geração de créditos de carbono.....	22
ARTIGOS-RESUMO: PESQUISAS EM BIOTECNOLOGIA APLICADAS À INDÚSTRIA	27
Avaliação econômica de arboviroses: impacto sobre o ambiente ocupacional brasileiro.....	28
Produção de óleo a partir de microalga como novo ingrediente para a fabricação de produtos cárneos "plant based"	32
Metodologias alternativas para extração do corante azul natural Ficocianina para aplicação industrial em bebidas.....	37
Biofertilizante a partir de biomassa de microalga (<i>Arthrospira sp.</i>) cultivada em efluente industrial cervejeiro.....	44
Desenvolvimento e produção de bioplástico a partir de macro e microalgas num sistema de cultivo sustentável.....	50
ARTIGOS-RESUMO: PESQUISAS EM TECNOLOGIAS DE MATERIAIS APLICADAS À INDÚSTRIA	56
Desenvolvimento de nanocompósitos poliméricos a base de polietileno de alta densidade (PEAD) e poliamida 11 (PA11) pós-consumo proveniente de plataforma <i>offshore</i> e nanopartículas de dióxido de silício (SiO ₂).....	57
Rotas tecnológicas para valorização de resíduos plásticos flutuantes da Baía de Guanabara.....	63
Sistema ultrassônico de medição sem contato por método diferencial para avaliação da espessura de correias transportadoras.....	67

Mensagem da Gestão

A pesquisa, o desenvolvimento e a inovação constituem pilares estratégicos para o fortalecimento da competitividade industrial e para a promoção do desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, iniciativas que estimulam a disseminação do conhecimento, a integração entre instituições e a valorização da ciência aplicada são fundamentais para o avanço do ecossistema de inovação no país.

Em 2023, realizamos a primeira edição do SPDE – Seminário de Pesquisa e Desenvolvimento, com o objetivo de disseminar os conhecimentos gerados nos projetos de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, fortalecendo a colaboração e a inovação entre nossos institutos. Na segunda edição, em 2024, incluímos como destaque uma sessão dedicada à importância da confidencialidade nos projetos de pesquisa e desenvolvimento, tema abordado pela Gerência Jurídica Empresarial, por se tratar de uma questão transversal e essencial para a excelência e a segurança dos projetos.

As edições de 2023 e 2024 reuniram pesquisadores dos Institutos SENAI e do Centro de Inovação SESI da Firjan e representaram um marco para nossas iniciativas, reforçando o propósito de consolidar o SPDE como um evento anual. Em 2025, alinhados ao compromisso institucional de promover um ambiente propício ao compartilhamento de ideias e à cooperação científica, ampliamos o alcance do seminário, abrindo espaço para a participação de pesquisadores de outras instituições, com apresentações voltadas a três eixos temáticos: tecnologias químicas, biotecnologia e tecnologias de materiais aplicadas à indústria.

Como estratégia para fomentar novas discussões e ampliar a integração entre diferentes áreas do conhecimento, o SPDE foi realizado de forma integrada à 1ª Conferência de Pesquisa e Desenvolvimento Industrial, que contou com a participação de especialistas e palestrantes nacionais e internacionais nas áreas de química, materiais e tecnologias convergentes, como biotecnologia e inteligência artificial.

A terceira edição do SPDE reafirma o posicionamento institucional de consolidar o seminário como um espaço permanente de intercâmbio de ideias, valorização da pesquisa e estímulo à inovação. Ao encerrar a edição de 2025, reiteramos nosso compromisso com o fortalecimento de parcerias estratégicas e com o desenvolvimento de projetos de pesquisa aplicados às demandas da indústria, confiantes de que os conhecimentos compartilhados contribuirão de forma significativa para o avanço da inovação industrial no país.

Carla Giordano

Gerente Regional de Pesquisa e Serviços Tecnológicos

Apresentação

O III SPDE – Seminário de Pesquisa e Desenvolvimento, organizado pela Firjan, ocorreu durante a 1ª Conferência de Pesquisa e Desenvolvimento Industrial, realizada na Inovateca do Parque Tecnológico da Universidade Federal do Rio de Janeiro, nos dias 12 e 13 de junho de 2025.

A conferência reuniu pesquisadores e especialistas de Instituições de Ciência e Tecnologia (ICT), universidades e empresas para discutir desafios e soluções inovadoras para um futuro mais sustentável da indústria na era digital. O objetivo do evento foi fomentar a colaboração interdisciplinar, a troca de conhecimentos e o estímulo a parcerias que acelerem a transição para um futuro industrial mais sustentável.

Em sua terceira edição, o SPDE recebeu trabalhos de pesquisadores externos à Firjan, que representaram 34% (trinta e quatro por cento) da autoria das pesquisas aprovadas e apresentadas durante o seminário. Foram aceitos trabalhos em três eixos temáticos: a) Tecnologias de química aplicada à indústria; b) Biotecnologia aplicada à indústria; c) Tecnologias de materiais aplicadas à indústria.

O III SPDE contou com a apresentação de 18 (dezoito) pesquisas, no formato de pôster digital, desenvolvidas por pesquisadores dos Institutos SENAI de Inovação e Tecnologia, do Centro de Inovação SESI, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, da Universidade Estadual do Rio de Janeiro, da Ambev, da Iconic Lubrificantes e do Cenpes.

No entanto, considerando a confidencialidade das informações e o interesse dos autores em publicar suas pesquisas, este anuário reúne 12 (doze) artigos-resumo dos trabalhos apresentados no III SPDE.

6



ARTIGOS- RESUMO

*Pesquisas em
tecnologias de
químicas aplicadas
à indústria*



Desenvolvimento de um protótipo para captura de CO₂ direta do ar

Ronney José Oliveira Santos¹; Karollyne Gomes de Castro Monsorez²; Marcos Vinícios dos Santos Martins³.

Resumo

Nas últimas décadas, o impacto das atividades humanas sobre o meio ambiente tem intensificado as mudanças climáticas, levando governos e indústrias a estabelecerem metas para diminuir a emissão de gases de efeito estufa. Pesquisas recentes vêm ampliando o debate sobre as origens e consequências dessas mudanças, apontando setores como transporte, indústria, agricultura e desmatamento como os principais responsáveis pelo aquecimento global. Para enfrentar esses desafios, estudos vêm destacando o papel das Tecnologias de Emissões Negativas (NET), que visam remover o CO₂ da atmosfera. Entre elas, a tecnologia DAC (Captura Direta do Ar) tem se mostrado eficaz ao capturar o dióxido de carbono presente no ar por meio de materiais capazes de adsorvê-lo, sendo uma solução viável principalmente para setores com alta dificuldade de reduzir suas emissões. Com base nesse cenário, a proposta tem como foco o desenvolvimento de um protótipo DAC utilizando adsorventes funcionalizados com biomassa, prevendo uma capacidade inicial de até 0,2 kg de CO₂ por kg de adsorbente por ciclo de saturação. Essa iniciativa representa um avanço importante rumo à descarbonização, mitigação de gases de efeito estufa e à construção de um futuro mais sustentável.

Palavras-chave: Mudanças climáticas. Emissões. Descarbonização. DAC.

Abstract

In recent decades, the impact of human activities on the environment has intensified climate change, leading governments and industries to set targets to reduce greenhouse gas emissions. Recent research has broadened the debate on the origins and consequences of these changes, identifying sectors such as transportation, industry, agriculture, and deforestation as the main contributors to global warming. To tackle these challenges, studies have highlighted the role of Negative Emissions Technologies (NETs), which aim to remove CO₂ from the atmosphere. Among them, Direct Air Capture (DAC) technology has proven effective by capturing carbon dioxide from the air using materials capable of adsorbing it, representing a viable solution especially for sectors where emission reductions are particularly difficult. In this context, the proposal focuses on developing a DAC prototype using biomass-functionalized adsorbents, with an initial capacity forecast of up to 0.2 kg of CO₂ per kg of adsorbent per saturation cycle. This initiative represents a significant step toward decarbonization, greenhouse gas mitigation, and the construction of a more sustainable future.

Keywords: Climate change. Emissions. Decarbonization. DAC.

1 Analista de Serviços Tecnológicos III, Firjan SENAI - IST Q&MA. rjsantos@firjan.com.br.
2 Analista de Serviços Tecnológicos II, Firjan SENAI - IST Q&MA. kgomonsorez@firjan.com.br.
3 Estagiário de nível superior, Firjan SENAI - IST Q&MA. mavmartins@firjan.com.br.

Introdução

A luta contra as mudanças climáticas demanda uma ação conjunta entre os setores público e privado, sendo impulsionada pela inovação tecnológica. A transição para uma matriz energética mais limpa é um dos principais desafios globais, e mesmo com a meta de emissões líquidas zero até 2050, a demanda por combustíveis fósseis irá persistir. Nesse contexto, a tecnologia CCUS (Captura, Uso e Armazenamento de Carbono) surge como uma solução essencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover a sustentabilidade energética. A análise de experiências internacionais destaca a importância de hubs integrados para viabilizar projetos de CCUS, compartilhando riscos e investimentos.

A CCUS abrange tecnologias que visam reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO₂) por meio de captura (seja por fontes estacionárias, como termelétricas ou indústrias), utilização e armazenamento (a exemplo de formações geológicas, onde podem ser aplicadas em cadeias de produção de hidrogênio e captura de CO₂ com base na reforma a vapor do gás natural). Sendo possível a obtenção de um combustível de baixo carbono, quando acoplado a atividades de CCS ao processo.

Dentre as tecnologias CCUS, a captura direta do ar (DAC – *direct air capture*), é uma tecnologia inovadora que utiliza unidades de captura para aspirar o ar em ambientes abertos. Nesse processo, o CO₂ é separado do ar através de processos físico-químicos, onde os demais componentes presentes no ar são devolvidos à atmosfera. Até o presente momento, apenas 27 plantas de DACCS/DAC estão em operação no mundo, com capacidade de capturar cerca de 0,01 Mt de CO₂ por ano.

Buscando contribuir com o desenvolvimento de plantas de DAC, a proposta tem como objetivo a elaboração de um protótipo, iniciando no TRL 4 e finalizando no TRL 6. O protótipo de DAC apresenta grande potencial na redução de emissões de gases de efeito estufa, sendo considerado uma solução viável na mitigação de impactos ocasionados pelas mudanças climáticas.

Desenvolvimento e resultados

Metodologia

Inicialmente serão adquiridos adsorventes funcionalizados com biomassa, a partir dos estudos e da patente desenvolvidos por Pinto *et al.*, 2024, visando propriedades específicas para a captura de CO₂. Após essa etapa, os materiais serão submetidos a caracterizações físico-químicas, com o objetivo de avaliar sua estrutura, composição e propriedades de superfície. Na segunda fase, com base nos resultados de caracterização obtidos, será realizado um levantamento dos parâmetros críticos que influenciam a adsorção de CO₂, a exemplo da porosidade e composição química do material, a fim de identificar as condições mais favoráveis para a maximização do desempenho dos adsorventes.

Na terceira etapa, será montado um sistema experimental onde o adsorvente será exposto a diferentes fluxos de CO₂ puro ou de misturas gasosas que simulem a composição do ar atmosférico (N₂/O₂). Após o período de exposição, será quantificado o CO₂ adsorvido, fornecendo os dados necessários para a avaliação do desempenho do adsorvente.

Por fim, na quarta fase, será realizada a construção do protótipo DAC com o objetivo de validar os parâmetros obtidos nas fases anteriores. O projeto considerará diversas variáveis como: condições operacionais, segurança, dimensões físicas, instrumentação, automação do processo e eficiência de captura de CO₂.

O projeto traça uma trajetória bem definida, unindo uma metodologia sólida, mitigação dos riscos tecnológicos e adesão às normas globais. A implementação do protótipo se destaca como um fator estratégico, evidenciando que a mudança para uma planta industrial é possível do ponto de vista técnico e financeiramente atraente, especialmente em um cenário de crescente regulação climática.

Resultados e discussões

Resultados esperados

A caracterização físico-química do adsorvente empregado indicará se o material possui propriedades específicas para serem expostos ao ar atmosférico para captura de CO₂ utilizando a tecnologia DAC. A análise textural fornecerá informações importantes acerca da porosidade, área superficial e volume de poros, que são parâmetros importantes para a quantificação do CO₂ adsorvido.

Os ensaios de adsorção de CO₂ em bancada fornecerão parâmetros importantes, como capacidade de adsorção, seletividade, cinética de adsorção e ciclo de vida do adsorvente. Essas informações serão fundamentais para avaliar o desempenho do adsorvente e como base para o escalonamento da construção do protótipo de DAC.

Os resultados esperados também incluem a quantidade de CO₂ capturada pela tecnologia, prevendo uma capacidade inicial de até 0,2 kg de CO₂ por kg de adsorvente por ciclo de saturação (acima de 90% em relação ao total presente na mistura gasosa); pureza do CO₂ recuperado através da análise de concentração; eficiência energética de captura estimando a quantidade de energia necessária para operar o sistema entre 200 e 500 kWh por tonelada de CO₂; regeneração e utilização do adsorvente; e tempo de vida útil do protótipo (empregando a análise de desempenho por ciclos de adsorção/dessorção).

Com isso, é possível afirmar que a tecnologia DAC pode impulsionar a transição verde em setores estratégicos, como na indústria de petróleo e gás; na agroindústria; no setor energético, entre outras, onde é possível combinar a redução de emissões com a oportunidade econômica circular.

Conclusão

Nesse resumo, foi possível realizar uma análise prévia da eficácia da tecnologia DAC, que auxilia de forma significativa nas metas globais de redução nas emissões de CO₂. A implementação da abordagem sugerida deve resultar em avanços importantes, como a identificação de materiais eficientes para adsorção e definição dos parâmetros operacionais ideais, além da construção de um protótipo DAC. Adicionalmente, os testes experimentais irão validar o desempenho desses materiais em condições reais, fornecendo dados técnicos cruciais para o desenvolvimento de sistemas em maior escala. Nesse projeto, será possível observar o potencial de acelerar o desenvolvimento de captura direta do carbono no Brasil, promovendo soluções mais sustentáveis que possam atender às metas climáticas globais e incentivem a adoção de novas tecnologias no setor energético. A implementação desse sistema pode auxiliar em uma nova matriz energética de baixo carbono, gerando impactos ambientais e econômicos positivos.

Referências

HARRISON, S. Advancing carbon capture technologies in CCS: a comprehensive review of pre-combustion processes. **Journal of Gas Science and Engineering**, v. 131, p. 205481, 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Operational and planned BECCS capture capacity vs. the Net Zero Scenario, 2022-2030**. IEA, Paris, 2023. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/operational-and-planned-beccs-capture-capacity-vs-the-net-zero-scenario-2022-2030>>. Acesso em: 29 abr. 2025.

PEH, S. B.; ZHAO, D. Tying amines down for stable CO₂ capture. **Science**, v. 369, n. 6502, p. 372–373, 2020.

PINTO, B. P. *et al.* **Dispositivo composto por módulos e processo integrado de captura de dióxido de carbono do ar atmosférico ou mistura de gases, com o uso de adsorventes alternativos**. Brasil. Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Pedido de patente BR 10 2024 014911, 2024.

SMITH, P. *et al.* Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions. **Nature Climate Change**, v. 6, p. 42–50, 2016.

WORLD RESOURCES INSTITUTE. **Direct air capture: assessing impacts to enable responsible scaling**. Washington, DC, 2022. Disponível em: <<https://www.wri.org/research/direct-air-capture-impacts>>. Acesso em: 29 abr. 2025.

WORLD RESOURCES INSTITUTE. **To unlock the potential of direct air capture, we must invest now**. Washington, DC, 2020. Disponível em: <<https://www.wri.org/insights/unlock-potential-direct-air-capture-we-must-invest-now>>. Acesso em: 29 abr. 2025.

ZHOU, L. *et al.* Structure–property CO₂ capture performance relations of amine-functionalized porous silica composite adsorbents. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 10, n. 40, p. 34340–34354, 2018.

EstAlgíario: sistema inteligente de automatização de dados cromatográficos

Leonardo Guimarães da Silva⁴, Leticia Oliveira da Silva⁵, Weslei Costa da Silva⁶

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento do *estAlgíario*, um sistema inteligente projetado para automatizar a análise cromatográfica de amostras complexas. O sistema integra três módulos principais: integração numérica de picos, identificação automatizada dos compostos e quantificação baseada em modelos de aprendizado de máquina. A plataforma foi desenvolvida utilizando linguagem Python e emprega algoritmos clássicos, como a regra do trapézio e de Simpson, além de técnicas de regressão supervisionada, como MLR, PLS e Gradient Boosting. Aplicações práticas demonstraram uma significativa redução no tempo de análise, com alta acurácia na identificação dos compostos. O *estAlgíario* mostrou-se uma solução eficaz e promissora para laboratórios que buscam maior eficiência, reprodutibilidade e automatização no tratamento de cromatogramas. Estudos futuros incluem o aprimoramento dos modelos de regressão e a integração com sistemas de gerenciamento laboratorial (LIMS).

Palavras-chave: Cromatografia gasosa. Integração de picos. Aprendizado de máquina. Automação analítica.

Abstract

This study presents the development of *estAlgíario*, an intelligent system designed to automate the chromatographic analysis of complex samples. The platform integrates three main modules: numerical peak integration, automated compound identification, and quantification based on machine learning models. The system was implemented using Python and incorporates classical algorithms such as the trapezoidal rule and Simpson's method, as well as supervised regression techniques like MLR, PLS, and Gradient Boosting. Practical applications demonstrated a significant reduction in analysis time while maintaining high accuracy in compound identification. *estAlgíario* proved to be an effective and promising solution for laboratories seeking increased efficiency, reproducibility, and automation in chromatogram processing. Future work includes improving regression models and integrating the system with laboratory information management systems (LIMS).

Keywords: Gas chromatography. Peak integration. Machine learning. Analytical automation.

4 Analista de Serviços Tecnológicos II, Firjan SENAI IST QMA. leogilva@firjan.com.br

5 Analista de Serviços Tecnológicos II, Firjan SENAI IST QMA. letosilva@firjan.com.br

6 Coordenador de Serviços Tecnológicos, Firjan SENAI IST QMA. wcostas@firjan.com.br

Introdução

A cromatografia configura-se como uma técnica analítica amplamente empregada na caracterização de misturas complexas, sendo aplicada em diversas áreas da química, incluindo os setores petroquímico (BEREZKIN, 1974), alimentício (CHEN *et al.*, 2025), farmacêutico (HUIDOBRO *et al.*, 2006), entre outros. Trata-se de um método de separação no qual os componentes a serem separados são distribuídos entre duas fases: a estacionária e a móvel (IUPAC, 1993). A separação cromatográfica resulta em um gráfico denominado cromatograma, no qual os diferentes compostos são representados por picos, cada qual relacionado a um componente distinto, separado em função do tempo de retenção (IUPAC, 1993). A identificação dos compostos é usualmente realizada com base nesse parâmetro, visto que o tempo de retenção é característico para cada substância, desde que as condições operacionais do sistema se mantenham constantes (ZAKIR *et al.*, 2025). Por sua vez, a quantificação dos analitos é obtida pela integração da área sob cada pico, uma vez que essa área é proporcional à concentração do composto na amostra, desde que previamente calibrada por meio de padrões de concentração conhecida.

Embora os softwares de aquisição e tratamento de dados cromatográficos realizem, em geral, a integração de forma automática, esse processo frequentemente apresenta limitações, sobretudo em amostras de elevada complexidade. A presença de picos sobrepostos, variações na linha de base e uma razão sinal-ruído desfavorável podem comprometer a precisão da integração, levando a erros significativos na quantificação dos analitos. Além disso, em determinadas análises que não possuem padrão, a integração manual faz-se necessária. Tal cenário é particularmente crítico em centros de pesquisa e desenvolvimento, como é o caso do Cenpes, em parceria com o Instituto SENAI de Tecnologia em Química e Meio Ambiente, onde as análises envolvem amostras com dezenas de constituintes em concentrações extremamente reduzidas e determinados projetos não possuem padrão de referência para certas análises. Nessas condições, a integração automática mostra-se frequentemente inadequada, exigindo a realização manual da integração, que pode demandar várias horas de trabalho analítico para a correta quantificação de todos os componentes de uma única amostra.

Com o avanço das tecnologias de inteligência artificial (SATUSHE *et al.*, 2025) e aprendizado de máquina (HEMAVATHI *et al.*, 2024), surge a oportunidade de automatizar e otimizar essas etapas de forma robusta, precisa e escalável. Tais tecnologias têm demonstrado enorme potencial em áreas como reconhecimento de padrões (THEODOSIOU *et al.*, 2023), regressão de dados multivariados (FAKAYODE *et al.*, 2014) e automação de processos laboratoriais (HUANG *et al.*, 2025).

Nesse contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento do *estAlgiário*, um sistema inteligente projetado para automatizar o tratamento de dados cromatográficos. O *estAlgiário* realiza, em sequência, a integração numérica dos picos cromatográficos, a identificação automática dos compostos com base em características extraídas dos próprios picos (como tempo de retenção, largura, assimetria e simetria) e, por fim, a quantificação dos compostos utilizando modelos de aprendizado de máquina previamente treinados com dados históricos. Daí vem o nome do sistema: assim como o estagiário é um aprendiz, o *estAlgiário* aprende com os dados para realizar previsões.

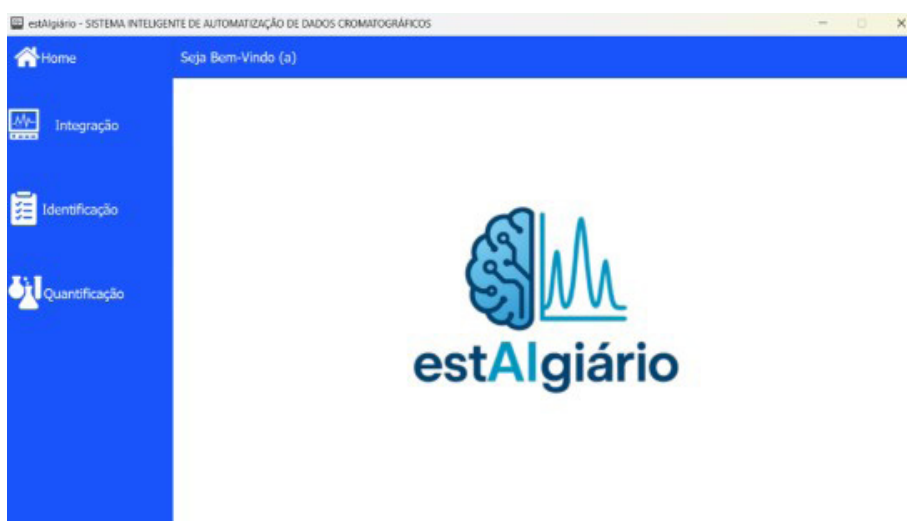
O sistema foi idealizado para funcionar de forma autônoma, desde a leitura do cromatograma bruto até a entrega do relatório analítico contendo os compostos identificados e suas respectivas concentrações. Para isso, combina algoritmos de integração numérica, classificação supervisionada e regressão multivariada, formando um fluxo analítico completo e inteligente.

Desenvolvimento e Resultados

O desenvolvimento do *estAlgiário* fundamentou-se na necessidade de integrar diversas etapas do processamento cromatográfico em uma plataforma única e autônoma. A arquitetura do sistema foi estruturada em três módulos principais: (i) módulo de integração numérica, (ii) módulo de identificação automatizada e (iii) módulo de regressão e quantificação. O primeiro módulo foi projetado para processar arquivos contendo os dados brutos do cromatograma (tempo de retenção, intensidade e outros descritivos para a correta plotagem do gráfico), aplicando algoritmos

de suavização, correção de baseline e detecção de picos. O segundo módulo realiza a extração de características morfológicas dos picos (como altura, largura e simetria) e compara essas características com um banco de dados interno para fins de identificação. Por fim, o módulo de regressão emprega modelos de aprendizado supervisionado, como MLR (regressão linear múltipla), PLS (regressão por mínimos quadrados parciais) e Gradient Boosting, treinados previamente com um banco de dados amostral, para estimar a concentração de cada composto identificado. Ao unir esses módulos em uma interface única, o estAlgiário proporciona uma **automação completa** da análise cromatográfica, desde a leitura do arquivo até a geração de relatórios analíticos. Essa abordagem sistêmica garante maior robustez, reprodutibilidade e usabilidade, especialmente para usuários não familiarizados com programação. A Figura 1 apresenta a tela inicial do sistema *estAlgiário*.

Figura 1. Tela inicial do sistema *estAlgiário*



Metodologia

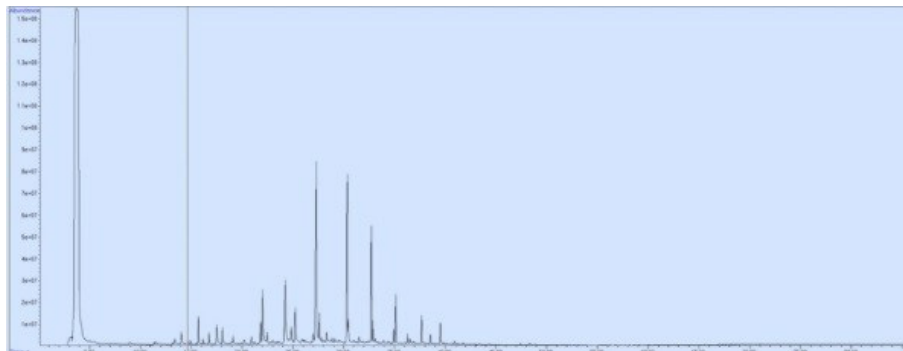
Inicialmente, foram coletados dados cromatográficos de amostras reais analisadas em cromatógrafos com fase móvel gasosa com detectores do tipo FID (Flame Ionization Detector). Os dados foram tratados em Python utilizando bibliotecas como Pandas, NumPy e SciPy. A integração numérica foi realizada com base na regra do trapézio e de Simpson. A identificação foi feita por comparação com uma biblioteca de tempos de retenção. Para a quantificação, os modelos foram treinados utilizando curvas de calibração contendo padrões em diferentes concentrações, com validação cruzada para seleção do modelo mais robusto.

Além dos dados brutos de intensidade em função do tempo, foram extraídas variáveis descritivas dos picos cromatográficos, como tempo de retenção, altura, largura, simetria e assimetria. Essas features foram fundamentais tanto para a integração numérica, permitindo a delimitação precisa das áreas dos picos, quanto para a qualificação e quantificação dos compostos. Durante a etapa de identificação, as características extraídas foram comparadas com valores de referência. Na etapa de regressão, essas variáveis foram utilizadas como entradas para os modelos de aprendizado supervisionado, contribuindo para maior acurácia na estimativa das concentrações.

Resultados e discussões

A aplicação do **estAlgíario** permitiu a automação eficiente da análise cromatográfica, com redução significativa do tempo de análise e acurácia média acima de 95% na identificação. A Figura 2 ilustra um cromatograma representativo, evidenciando a complexidade da matriz analisada.

Figura 2. Cromatograma obtido da análise cromatográfica de compostos oxigenados



A arquitetura modular adotada — com divisão em integração, identificação e regressão — favoreceu a escalabilidade do sistema, permitindo atualizações independentes e futura incorporação de novos algoritmos. Essa estrutura garante flexibilidade e facilita a manutenção e expansão do software.

Do ponto de vista prático, o impacto da ferramenta é expressivo, promovendo padronização, redução de erros humanos e economia de tempo em rotinas laboratoriais. Ao centralizar todas as etapas em uma interface única, o sistema permite que análises antes restritas a especialistas e plataformas proprietárias sejam conduzidas de forma autônoma, prática e reproduzível em diferentes contextos laboratoriais.

Embora os resultados iniciais sejam promissores, a etapa de quantificação ainda está em desenvolvimento, com a avaliação de modelos de regressão mais robustos. O desempenho do sistema, como em toda abordagem baseada em aprendizado, depende da qualidade dos dados utilizados no treinamento, reforçando a importância de uma curadoria contínua do banco de dados.

Conclusão

O sistema *estAlgíario* demonstrou ser uma ferramenta eficaz para a automação do processo cromatográfico, integrando em uma única plataforma as etapas de integração e identificação. Sua aplicação em amostras complexas mostrou redução drástica no tempo de análise e elevado grau de confiabilidade dos resultados, tornando-se uma solução promissora para laboratórios que buscam modernizar seus processos e aumentar a eficiência analítica. Estudos futuros contemplam a expansão do banco de dados de compostos e integração com sistemas de gerenciamento laboratorial (LIMS).

Referências

BEREZKIN, V. G. Application of gas chromatography in petrochemistry and petroleum refining. **Journal of Chromatography A**, v. 91, p. 559-582, 24 abr. 1974.

CHEN, Z. *et al.* Recent progress in the application of chromatography-coupled mass-spectrometry in the analysis of contaminants in food products. **Food Chemistry: X**, v. 27, p. 102397, abr. 2025.

FAKAYODE, S.; MITCHELL, B.; POLLARD, D. A. Determination of boiling point of petrochemicals by gas chromatography-mass spectrometry and multivariate regression analysis of structural activity relationship. **Talanta**, v. 126, p. 151-156, 1 ago. 2014.

HEMAVATHI, B. *et al.* Machine learning in the era of smart automation for renewable energy materials. **E-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy**, v. 7, p.100458, mar. 2024.

HUANG, P. *et al.* Transformative laboratory medicine enabled by microfluidic automation and artificial intelligence. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 271, p. 117046, 1 mar. 2025.

HUIDOBRO, A. L. *et al.* Tandem column for the simultaneous determination of arginine, ibuprofen and related impurities by liquid chromatography. **Journal of Chromatography A**, v. 1119, p. 238-245, 30 jun. 2006.

IUPAC. Nomenclature for chromatography. **Pure and Applied Chemistry**, v. 65, n. 4, p. 819-872, 1993.

SATUSHE, V. *et al.* AI in MRI brain tumor diagnosis: a systematic review of machine learning and deep learning advances (2010–2025). **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, p. 105414, 24 abr. 2025.

THEODOSIOU, T. *et al.* A review study on ML-based methods for defect-pattern recognition in wafer maps. **Procedia Computer Science**, v. 217, p. 570-583, 2023.

ZAKIR, M.; LEVATTE, M. A.; WISHART, D. S. RT-Pred: A web server for accurate, customized liquid chromatography retention time prediction of chemicals. **Journal of Chromatography A**, v. 1747, p. 465816, 26 abr. 2025.

Projeto Sig@s Maricás: integrando dados de biodiversidade e geotecnologias na gestão sustentável das Ilhas Maricás - RJ

Estéfane Cardinot Reis⁷, Carolina Soares de Carvalho⁸, Victor Manuel Leon-Díaz⁹, Bernard Melo Campos¹⁰,
Guilherme Luiz Garcia Pereira¹¹

Resumo

A gestão sustentável das Ilhas Maricás requer uma abordagem integrada que combine pesquisa de biodiversidade e geotecnologias, foco das ações do Projeto Sig@s Maricás, executado pela Firjan SENAI em parceria com o Programa Petrobras Socioambiental. Este estudo utilizou Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e sensoriamento remoto para espacializar a biodiversidade e a geodiversidade das Ilhas Maricás, identificando áreas prioritárias para conservação a partir de levantamentos de campo no arquipélago. A integração das geotecnologias com dados biológicos permitiu a identificação de *hotspots* de biodiversidade e de áreas prioritárias para a conservação. A criação de um SIG com dados de biodiversidade e geodiversidade das Ilhas Maricás permitirá a identificação de pontos críticos na gestão sustentável desse território, além de criar uma linha de base para comparações futuras a partir de ações de monitoramento. Tais dados também podem servir para orientar ações de conservação focados em grupos taxonômicos específicos e identificar lacunas de conhecimento para futuras pesquisas. A condução de projetos dessa natureza tem o potencial de impactar positivamente a gestão desse território, o uso sustentável de seus recursos e a preservação ambiental, paralelamente gerando uma imagem positiva de indústrias que orientarem suas atividades com preocupações socioambientais.

Palavras-chave: Biodiversidade. Geotecnologias. Preservação. Sustentabilidade.

Abstract

The sustainable management of the Maricás Islands requires an integrated approach that combines biodiversity research and geotechnologies, which are the focus of the Sig@s Maricás Project, implemented by Firjan SENAI in partnership with the Petrobras Socioenvironmental Program. This study employed Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing to spatially analyze the biodiversity and geodiversity of the Maricás Islands, identifying priority areas for conservation based on field surveys conducted throughout the archipelago. The integration of geotechnologies with biological data enabled the identification of biodiversity hotspots and priority conservation areas. The development of a GIS database on the biodiversity and geodiversity of the Maricás Islands will support the identification of critical areas for the sustainable management of this territory and provide a baseline for future comparisons through monitoring actions. These data can also guide conservation initiatives focused on specific taxonomic groups and help identify knowledge gaps for future research. Projects of this nature have the potential to positively influence the management of this territory, the sustainable use of its resources, and environmental preservation, while also enhancing the public image of industries that align their operations with socioenvironmental concerns.

Keywords: Biodiversity. Geotechnologies. Preservation. Sustainability.

7 Especialista de Serviços Tecnológicos, Firjan SENAI IST QMA. ecreis@firjan.com.br
8 Analista de Serviços Tecnológicos II, Firjan SENAI IST QMA. carvalho@firjan.com.br
9 Analista de Serviços Tecnológicos I, Firjan SENAI IST QMA. vdiaz@firjan.com.br
10 Estagiário de Projetos Socioambientais, Firjan SENAI IST QMA. bcampos@firjan.com.br
11 Pesquisador bolsista, Firjan SENAI IST QMA. glgpereira@pesquisador.firjan.com.br

Introdução

A costa do Estado do Rio de Janeiro está situada em uma zona de transição entre as ecorregiões do Atlântico Sudoeste Tropical e Temperado Quente (SPALDING *et al.*, 2007). Esta região abriga uma rica diversidade de espécies tropicais e temperadas próximas de seus limites de distribuição, além de uma alta proporção de espécies endêmicas (BEGER, 2014). No entanto, os esforços de pesquisa científica ainda são insuficientes em muitas áreas, gerando lacunas no conhecimento sobre os ecossistemas costeiros, como no caso do arquipélago das Ilhas Maricás, Maricá - RJ. Essa falta de conhecimento dificulta a implementação de ações de conservação e gestão sustentável eficazes, podendo levar ao esgotamento de recursos e a uma série de impactos socioambientais. O Projeto Sig@s Maricás é um projeto socioambiental que vem sendo executado desde 2023 pela Firjan SENAI em parceria com o Programa Petrobras Socioambiental. O objetivo geral deste projeto é promover ações de sensibilização, educação ambiental e capacitação de multiplicadores na população de Maricá, fortalecendo iniciativas de conservação por meio do conhecimento sobre a biodiversidade marinha e terrestre e da geodiversidade das Ilhas Maricás. Para isso, estão sendo implementados três eixos de ações paralelas: levantamento da biodiversidade das Ilhas Maricás; levantamento geológico das ilhas, com o desenvolvimento de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) colaborativo; e ações de sensibilização e educação ambiental com toda a população do município. A utilização de geotecnologias é fundamental para mapear e localizar as áreas de alta biodiversidade, permitindo a identificação de áreas prioritárias para conservação (DI DOMENICO *et al.*, 2012; MARQUES; SANTOS, 2022). As geotecnologias são essenciais na natureza de projetos desse tipo, pois auxiliam no planejamento de atividades de campo, no desenvolvimento de sistemas de monitoramento e na elaboração de estratégias de conservação e preservação dos recursos naturais (Santos *et al.*, 2022). A criação bancos de dados de biodiversidade e geodiversidade das Ilhas Maricás permitirá a identificação de pontos críticos na gestão sustentável desse território, além de criar uma linha de base para comparações futuras a partir de ações de monitoramento (CORDEIRO, 2022). Tais dados também servem para orientar ações de conservação focados em grupos taxonômicos específicos e identificar lacunas de conhecimento para futuras pesquisas. A condução de projetos dessa natureza tem o potencial de impactar positivamente a gestão e uso sustentável de recursos naturais e a preservação ambiental, paralelamente gerando uma imagem positiva de indústrias que orientem suas atividades com preocupações socioambientais.

Desenvolvimento e resultados

Metodologia

O estudo foi estruturado em quatro fases principais, integrando dados de biodiversidade e geodiversidade das Ilhas Maricás com ferramentas geoespaciais: planejamento pré-campo, coleta de dados em campo, digitalização e processamento, e análise e interpretação dos dados.

1. Atividades de pré-campo: Foram planejadas campanhas terrestres e subaquáticas, com definição dos alvos de estudo, métodos de coleta e equipamentos necessários. As equipes multidisciplinares foram organizadas conforme as especialidades exigidas por cada etapa. A revisão bibliográfica foi incorporada ao planejamento para garantir a aderência a metodologias reconhecidas (DAWSON *et al.*, 2008; WILLIAMS; THOMAS, 2009).

2. Coleta de dados em campo: No ambiente marinho, foram realizadas campanhas de mergulho científico com uso de câmeras subaquáticas e pranchetas de anotação, seguindo protocolos de identificação visual e avaliação qualitativa das assembleias de peixes e da comunidade bentônica. Os pontos de mergulho foram distribuídos ao redor das ilhas, com profundidades entre 2 e 10 metros, sendo realizados levantamentos específicos de fauna aos 3, 6 e 10 metros de profundidade.

Durante os percursos na Ilha Principal, foram registrados visualmente aves, mamíferos e répteis. Para a vegetação, adotou-se uma amostragem estratificada, com 11 parcelas retangulares orientadas para o norte, distribuídas entre áreas com vegetação de maior porte e arbustiva densa. Também foi realizado um caminhamento ativo por toda a ilha para registrar o maior número possível de espécies vegetais. A identificação botânica foi feita preferencialmente em campo ou por coleta de amostras para exsicatas, posteriormente comparadas com herbários virtuais. Para os dados geoespaciais, foram realizados voos com drones equipados com câmeras RGB de alta resolução. As imagens foram processadas, gerando ortomosaicos e modelos digitais de superfície para análise da cobertura vegetal e feições ambientais.

3. Digitalização e processamento dos dados: Os dados coletados foram organizados, filtrados e processados. As informações de biodiversidade foram espacializadas em ambiente SIG (QGIS), permitindo mapear a distribuição dos táxons identificados. As imagens de drone foram utilizadas para gerar produtos cartográficos de alta resolução.

4. Análise e interpretação das informações: A análise espacial utilizou técnicas de interpolação e geoestatística. No ambiente marinho, foi desenvolvido um modelo preditivo de distribuição da biodiversidade com base em regressão espacial, identificando áreas prioritárias para conservação. No ambiente terrestre, foi elaborado um mapa de densidade de espécies arbóreas e arbustivas com base no inventário florístico, utilizando a técnica de Estimativa de Densidade de Kernel, que permite representar padrões espaciais de ocorrência de forma não paramétrica (SILVERMAN, 1986; HEIDEMANN *et al.*, 2023).

Resultados e discussões

Foram realizadas seis expedições às Ilhas Maricás, resultando na identificação de 96 táxons de invertebrados marinhos, 82 de peixes, 23 de macroalgas e uma espécie de tartaruga. No ambiente terrestre, foram registrados 72 táxons de plantas, 23 de aves, dois de mamíferos e um de réptil. Esses números reforçam o status das Ilhas como um *hotspot* de biodiversidade, especialmente marinha, o que está de acordo com estudos em outras ilhas costeiras brasileiras que apresentam alta diversidade associada a ambientes insulares e costões rochosos (PAGLIA *et al.*, 2012). Apesar da riqueza registrada, os dados também revelaram impactos ambientais relevantes, como a presença de espécies exóticas e invasoras, a homogeneidade da comunidade bentônica (dominada por algas formadoras de tapete) e a escassez de peixes de grande porte. Esses padrões são frequentemente associados à pressão antrópica, como pesca predatória, turismo desordenado e alterações no uso do solo, conforme discutido por Freitas *et al.* (2016). A análise espacial da biodiversidade marinha (Figura 1) indicou que a porção norte e abrigada da Ilha Principal concentrou a maior diversidade de espécies (66), possivelmente devido à maior complexidade de habitat e menor exposição a ondas — fatores que favorecem a diversidade, como apontado por Paglia *et al.* (2012). Em contraste, as Ilhas Anexo, Crioulas e Calhau apresentaram menor diversidade (36, 48 e 29 espécies, respectivamente), o que pode refletir tanto diferenças naturais quanto maior exposição a impactos humanos.

No ambiente terrestre, os dados florísticos revelaram maior densidade de vegetação na porção sul da Ilha Principal, enquanto a região norte, mais afetada por pisoteio, desmatamento seletivo e estruturas antrópicas, apresentou menor cobertura vegetal. A aplicação da Estimativa de Densidade de Kernel (Figura 2) permitiu visualizar essas variações, sendo uma ferramenta eficaz para identificar áreas prioritárias para conservação, especialmente em contextos de vulnerabilidade ecológica frente à ação humana e mudanças climáticas (SOUZA, 2011; DUARTE, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2021).

Esses resultados reforçam a necessidade de ações de manejo específicas para ambientes insulares, como o controle de espécies invasoras, regulamentação do turismo e criação de áreas de proteção integral. Também evidenciam a importância de monitoramento contínuo, como demonstrado pelo PELD ILOC (Programa Ecológico de Longa Duração nas Ilhas Oceânicas), que realiza o acompanhamento ecológico nas ilhas oceânicas brasileiras, como Fernando de Noronha, Atol das Rocas e Trindade e Martim Vaz (FERRARI, 2022).

Figura 1. Mapa de diversidade de espécies marinhas das Ilhas Maricás - RJ, onde a prioridade de conservação é diretamente proporcional à diversidade de espécies marinhas.

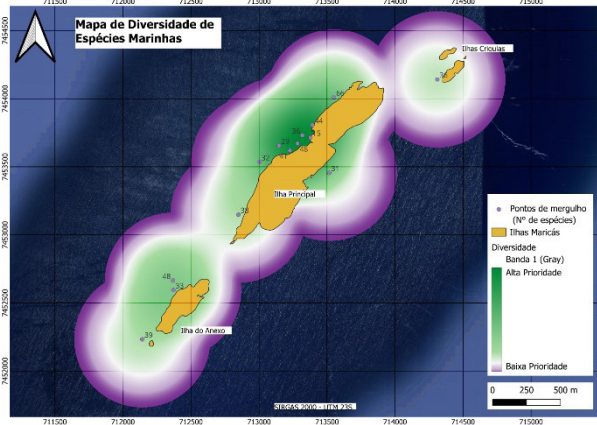
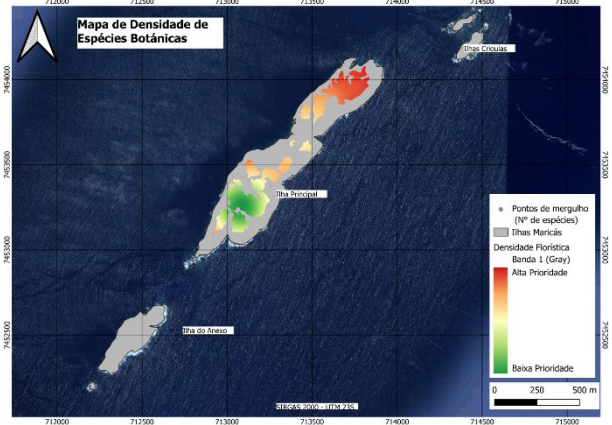


Figura 2. Mapa de densidade de espécies vegetais na Ilha Principal do Arquipélago das Ilhas Maricás - RJ, onde a prioridade de conservação é inversamente proporcional à densidade florística.



Conclusão

Os resultados obtidos neste estudo evidenciaram, de forma inequívoca, a importância ecológica e a vulnerabilidade ambiental das Ilhas Maricás, que se configuram como um verdadeiro *hotspot* de biodiversidade marinha e terrestre na costa do Estado do Rio de Janeiro. A utilização de geotecnologias, como SIG e técnicas de interpolação espacial, mostrou-se fundamental para o mapeamento de padrões de distribuição da biodiversidade e para o desenvolvimento de ferramentas estratégicas voltadas à gestão ambiental territorializada. Os resultados também revelaram desafios importantes, como a presença de espécies invasoras, a homogeneização de comunidades bentônicas e a escassez de peixes de grande porte, indicadores de pressão ecológica que demandam ações imediatas de mitigação. Além disso, o eixo educativo do projeto, voltado à sensibilização da população de Maricá, reforça o papel da ciência cidadã e da educação ambiental como pilares essenciais para a conservação efetiva e o uso sustentável dos recursos naturais. Nesse sentido, o Projeto Sig@s Maricás oferece um modelo replicável, que alia ciência, tecnologia e participação comunitária na construção de políticas públicas mais eficazes para a preservação dos ecossistemas. Além de contribuir para a gestão sustentável do território, o emprego de práticas socioambientais produz uma imagem positiva para as corporações, implicando em ganhos adicionais de confiança por parte da sociedade e do mercado.

Referências

BEGER, M. *et al.* Conserving potential coral reef refuges at high latitudes. **Diversity and Distributions**, v. 20, n. 3, p. 245-257, 2014.

CORDEIRO, C.A.M.M. *et al.* Long-term monitoring projects of Brazilian marine and coastal ecosystems. **California: PeerJ**, v. 10, p. e14313, 2022.

DI DOMENICO, M.; AGUIAR, L.; GARRAFFONI, A. Desafios da taxonomia: uma análise crítica. **Revista Orbis Latina-Racionalidades, Desenvolvimento e Fronteiras**, v. 2, n. 1, 2012.

DUARTE, R.; MELLO, C.E. **Estimando Densidades via Kernels: Uma Abordagem Paralela**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

- FERRARI, D. S. *et al.* A trait-based approach to marine island biogeography. **Hoboken: Wiley Journal of Biogeography**, v. 50, n. 3, p. 528-538, 2023.
- FREITAS, V. G.; ALMEIDA, J.; VITÓRIA, F. Avaliação de impactos, passivos e danos ambientais em zonas costeiras do Brasil: região do litoral norte fluminense. **Revista Sustinere**, v. 4, n. 1, p. 105-116, 2016.
- HEIDEMANN, A. S. **Estimativa de densidade de Kernel para modelagem da distribuição espacial em remanescente urbano de floresta ombrófila mista**. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, 2020.
- MARQUES, C. B.; SANTOS, R. F. Avaliação de metadados em repositórios de dados de pesquisa sobre biodiversidade. **Em Questão**, p. 117591-117591, 2022.
- OLIVEIRA, M. *et al.* Análise da estrutura horizontal por densidade de Kernel como subsídio ao manejo florestal na Amazônia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 41, 2021.
- PAGLIA, A. *et al.* Modelos de Distribuição de Espécies em Estratégias para a Conservação da Biodiversidade e para Adaptação Baseada em Ecossistemas Frente a Mudanças Climáticas. **Natureza & Conservação**, v. 10, n. 2, p. 231-34, 2012.
- SANTOS, L.; BRITO, T.; SILVA-NETO, C. Uso dos sistemas de informação geográficas (SIG) nas ciências ambientais entre 2009 e 2019: Uma análise cienciométrica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 4, p. 1715-1731, 2022.
- SPALDING, M. D. *et al.* Marine ecoregions of the world: a bioregionalization of coastal and shelf areas. **BioScience**, v. 57, n. 7, p. 573-583, 2007.
- SOUZA, C. R. G. Os ecossistemas costeiros frente às mudanças climáticas no Brasil: efeitos da elevação do nível do mar. **XIV Congresso Latino-Americano de Ciências do Mar-COLACMAR**, v. 30, p. 10-04, 2011.

Projeto Regenera Guará: como a restaurao de manguezais está associada  gerao de créditos de carbono

Estfane Cardinot Reis¹², Carolina Soares de Carvalho¹³, Victor Manuel Leon-Diaz¹⁴, Bernard Melo Campos¹⁵, Alan Andrade dos Santos¹⁶

Resumo

O Projeto Regenera Guará  um projeto socioambiental executado pela Firjan SENAI e viabilizado pelo Edital Floresta Viva - Manguezais do Brasil, apoiado pela Petrobras e BNDES e com gestão do FUNBIO. O projeto tem como objetivo realizar o diagnóstico ecológico do estado de degradao e das potencialidades do remanescente das áreas de manguezais da Reserva Biológica Estadual de Guaratiba no Rio de Janeiro, bem como elaborar e implementar um plano de restaurao em 220 hectares, divididos em seis polígonos, aliado a um monitoramento contínuo. Permeando tudo isso, o Regenera Guará busca articular os conhecimentos das comunidades locais com ao es de educao ambiental e responsabilidade social, fortalecendo os laços entre conservao e bem-estar comunitário. A implementao do plantio no polígono Embratel (com aproximadamente 81 hectares de área total) teve início na segunda quinzena de março de 2024, devido às condio es climáticas favoráveis. As atividades concentraram-se nas parcelas de linha de base, onde foram aplicadas técnicas de transplante de mudas e semeadura direta em 14 pontos amostrais distribuídos na rea. Além disso, devido ao papel crucial dos manguezais no sequestro de carbono, vem sendo realizados levantamentos com drones e análise dos índices espectrais para a contabilizao de créditos de carbono.

Palavras-chave: Manguezais. Restauração. Drone monitoramento. Geotecnologias.

22

Abstract

The Regenera Guará Project is a socio-environmental initiative carried out by Firjan SENAI and funded through the Floresta Viva - Manguezais do Brasil public call, with support from Petrobras and BNDES and managed by FUNBIO. The project's main objective is to conduct an ecological assessment of the degradation status and restoration potential of the mangrove remnants within the Guaratiba State Biological Reserve, in Rio de Janeiro. It also aims to design and implement a restoration plan for 220 hectares, divided into six polygons, coupled with ongoing ecological monitoring. Central to the project is the integration of traditional ecological knowledge from local communities through environmental education and social responsibility initiatives, reinforcing the connection between conservation and community well-being. The implementation of planting activities in the Embratel polygon (total area of 81 hectares) began in the second half of March 2024, taking advantage of favorable climatic conditions. Efforts were focused on baseline plots, where transplanting and direct seeding techniques were applied across 14 sampling points. Additionally, given the critical role of mangroves in carbon sequestration, drone surveys and spectral index analyses are being conducted to support the quantification of carbon credits.

Keywords: Mangroves. Restoration. Drone Monitoring. Geotechnologies.

12 Especialista de Serviços Tecnológicos, Firjan SENAI IST QMA. ecreis@firjan.com.br
13 Analista de Serviços Tecnológicos II, Firjan SENAI IST QMA. carcarvalho@firjan.com.br
14 Analista de Serviços Tecnológicos I, Firjan SENAI IST QMA. vdiaz@firjan.com.br
15 Estagiário de Projetos Socioambientais, Firjan SENAI IST QMA. bcampos@firjan.com.br
16 Pesquisador Bolsista, Firjan SENAI IST QMA. alansantos@pesquisador.firjan.com.br

Introdução

O Projeto Regenera Guará, também chamado de 'Diagnóstico, Restauração e Monitoramento de Manguezais: Potenciais Impactos Ambientais, Comportamento de Fauna e Geração de Créditos de Carbono', é executado pela Firjan SENAI e financiado pelo Edital Manguezais do Brasil, parte da iniciativa Floresta Viva do BNDES, com apoio da Petrobras e gestão do FUNBIO. Seu foco é a restauração e conservação dos manguezais da planície costeira de Guaratiba, na Reserva Biológica Estadual de Guaratiba (RBG) — a maior área contínua de manguezal da cidade do Rio de Janeiro e a segunda maior do estado. A RBG é uma Unidade de Conservação de proteção integral gerida pelo INEA e sob influência do Centro Tecnológico do Exército (CTEx), situado nas adjacências da reserva. O contexto macro sociodemográfico da área em questão é de expressivo crescimento desordenado, com consequente geração de estressores ambientais. Por ser uma região estratégica e prioritária, tanto do ponto de vista da proteção de ambientes costeiros e marinhos quanto das atividades econômicas, o principal objetivo do presente projeto é promover técnicas que permeiam a restauração ecológica de manguezais na RBG. A partir do diagnóstico ambiental realizado na região, delineou-se um Plano de Restauração centrado na técnica de Regeneração Natural Assistida (RNA), que prevê a mitigação de tensores bióticos e abióticos, retirada de espécies invasoras, enriquecimento e adensamento por transplântio de mudas, dentre outros.

Para a restauração dos manguezais degradados, o presente projeto também contempla ações de cunho socioambiental, visto que o envolvimento da comunidade local é imprescindível no cenário corrente de expansão imobiliária desordenada, poluição, lançamento de esgoto, queimadas e outras ações antrópicas. Assim, paralelamente às ações de restauração, o eixo social do projeto vem realizando o diagnóstico local para melhor articulação e mobilização da comunidade. Oficinas, workshops e mediação de conflitos socioambientais, além de ações voltadas para o desenvolvimento humano e educação ambiental, são estratégias previstas no presente projeto. As ações também envolveram a participação ativa da comunidade na recuperação das áreas, integrando os conhecimentos e as demandas das populações locais. Nesse sentido, foram promovidas ações para envolver a comunidade local, incluindo participação em eventos, oficinas comunitárias e ações de limpeza dos manguezais para engajar a população local, além de capacitações continuadas para a equipe operacional. Também foram realizadas saídas de campo que permitiram uma análise detalhada das condições das subáreas selecionadas para a restauração, iniciando distintas técnicas de regeneração. Além disso, devido ao papel crucial dos manguezais no sequestro de carbono (DONATO *et al.*, 2011), vêm sendo realizados levantamentos com drones e análise dos índices espectrais para a contabilização de créditos de carbono.

Desenvolvimento e resultados

Metodologia

Restauração Ecológica: As ações concentraram-se no polígono "Embratel" (81 ha), com transplântio de mudas nativas de mangue (*Laguncularia racemosa* (L.) C.F.Gaertn., *Avicennia schaueriana* Stapf e Leechm. ex Moldenke, e *Rhizophora mangle* L.) e semeadura direta em 14 pontos amostrais (100 m² cada ponto). A seleção dos locais considerou salinidade, tipo de solo e histórico de degradação. As atividades iniciaram-se em outubro de 2024, aproveitando o período de maior pluviosidade e marés favoráveis ao desenvolvimento das mudas. Cada ponto amostral recebeu um tratamento diferenciado quanto à escolha das espécies para o plantio. Em áreas com substrato lodoso e maior influência das marés, optou-se pela semeadura direta e pelo uso de mudas de *R. mangle*. Já nas áreas de terreno mais arenoso e com menor ação das marés, foram transplantadas mudas das espécies *L. racemosa* e *A. schaueriana*. Até o momento, não houve intervenção com semeadura direta de propágulos das duas últimas espécies mencionadas.

Monitoramento Aéreo e Estimativa de Biomassa: Drones com sensores RGB (*Red, Green and Blue*) captaram imagens com sobreposição de 65-75% e altitude de 100 m. As imagens foram processadas no Agisoft Metashape para gerar ortomosaicos e extrair os índices espectrais NGRDI (*Normalized Green-Red Difference Index*), RI (*Redness Index*) e ExG

(*Excess Green Index*) (Woebbecke, 1995). Esses índices foram utilizados como proxies para estimar a biomassa, conforme metodologias validadas por Arantes *et al.* (2020) e Paim *et al.* (2024), que demonstram forte correlação entre vigor vegetativo e acúmulo de biomassa em áreas de manguezal respectivamente.

O NGRDI é o mais eficaz para estimar a biomassa aérea em manguezais, pois é sensível à densidade e ao vigor da vegetação. Áreas com vegetação saudável tendem a refletir mais luz na banda verde e menos na banda vermelha, o que torna o NGRDI um indicador indireto confiável de biomassa. Essa característica é útil em ecossistemas como os manguezais, onde a vegetação costuma ser densa e relativamente homogênea (TRAN *et al.*, 2022).

Estimativa de Sequestro de Carbono: A biomassa estimada foi convertida em carbono com base na proporção de 50% de carbono na biomassa seca (BRAGA *et al.*, 2024; SUTTI *et al.*, 2018). O valor foi então convertido em CO₂ equivalente, permitindo avaliar o potencial de mitigação climática e o valor econômico do estoque de carbono no contexto do mercado voluntário de créditos de carbono.

Resultados e discussões

A implantação das técnicas de restauração resultou na cobertura de 3.147 m², sendo 1.609 m² com mudas transplantadas e 1.538 m² com semeadura direta. Observou-se maior uniformidade e taxa de estabelecimento nas áreas com mudas de *L. racemosa*, que representaram 60% dos indivíduos transplantados. Essa espécie demonstrou rápida adaptação ao ambiente, corroborando Menezes *et al.* (2005), que relataram alta taxa de sobrevivência e crescimento de *L. racemosa* em áreas restauradas da Baixada Santista. Já a semeadura direta com *R. mangle* apresentou variação espacial na germinação, influenciada por fatores como micro-relevo e salinidade, conforme também observado por Moscatelli e Almeida (1994).

Estudos indicam que o tempo médio para que áreas restauradas de manguezal atinjam condições estruturais e funcionais semelhantes a um manguezal típico varia entre 5-15 anos, dependendo do nível de degradação, da hidrologia local e das espécies utilizadas (MENGHINI, 2018). Em Guaratiba, o monitoramento bimestral previsto permitirá acompanhar parâmetros como taxa de sobrevivência, crescimento e cobertura vegetal, fornecendo dados essenciais para ajustes adaptativos. Essa abordagem está alinhada com recomendações de Silva *et al.* (2022), que destacam a importância de planos de manejo contínuos e sensíveis às mudanças climáticas para garantir a resiliência dos manguezais no estado do Rio de Janeiro.

Embora o processamento total das imagens ainda esteja em andamento, os primeiros resultados obtidos a partir de uma parcela já analisada indicam forte correspondência entre os padrões espectrais e as condições reais observadas em campo. Essa convergência reforça a viabilidade do uso do sensoriamento remoto como ferramenta confiável para o monitoramento da regeneração (HUNT, 2017). Os índices usados têm se mostrado promissores na estimativa da densidade da vegetação, identificação de áreas degradadas e avaliação do vigor da vegetação.

Estudos como o de Paim *et al.* (2024) demonstram que a aplicação de índices espectrais derivados de imagens RGB pode alcançar alta correlação com dados de biomassa obtidos em campo, especialmente quando combinados com classificadores supervisionados em SIG. De forma semelhante, Carvalho *et al.* (2023) utilizaram sensoriamento remoto para estimar biomassa em áreas de manguezal, obtendo resultados robustos. Esses achados reforçam que, mesmo com sensores ópticos simples, é possível gerar estimativas confiáveis de carbono, desde que calibradas com dados locais.

A replicação do modelo em outras áreas restauradas de Guaratiba permitirá consolidar uma metodologia robusta para estimativas indiretas de biomassa e evolução do sequestro de carbono. Essa abordagem integrada fortalece a base técnica do projeto e amplia seu potencial para certificações e geração de créditos ambientais. Além disso, contribui para o avanço do uso de tecnologias acessíveis no monitoramento de ecossistemas costeiros, promovendo maior eficiência e escalabilidade em projetos de restauração ecológica (ALMEIDA *et al.*, 2015).

Figura 1. Esforços de restauração através de transplântio de mudas (TR) e sementeira direta (SD) no polígono Embratel na área da Reserva Biológica Estadual de Guaratiba realizados pela equipe do Projeto Regenera Guará.



Lg = *L. racemosa* (mangue-branco); Av = *A. schaueriana* (mangue-preto ou siriúba);
 Rh = *R. mangle* (mangue-vermelho ou sapateiro).

Conclusão

Dessa forma, o Projeto Regenera Guará tem o potencial não apenas de restaurar os remanescentes de manguezais na área da RBG, mas também de viabilizar uma futura certificação de créditos de carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e incentivando a preservação desse ecossistema essencial. Além disso, o projeto gera um impacto social positivo ao empregar moradores locais como colaboradores diretos nas etapas de restauração e monitoramento, e ao realizar atividades de sensibilização ambiental nas comunidades locais. Os esforços conjuntos nas áreas de restauração, geotecnologias e social geram um impacto local positivo, além dos benefícios ecossistêmicos advindos da restauração.

Referências

- ALMEIDA, P.M.M.; SOARES, M. L. G.; KAMPEL, M. Monitoramento de uma área de manguezal na região metropolitana do Rio de Janeiro através de técnicas de sensoriamento remoto. **Congresso Brasileiro de Oceanografia**, Santos, 2015.
- ARANTES, L. *et al.* Comportamento espectral e detecção de laranjeiras (*Citrus sinensis* L. Osbeck) com estresse hídrico, por meio de drone. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 07, p. 3625-3635, 2020.
- CARVALHO, H. F. S. *et al.* Uso de Laser Scanner Terrestre para estimativa de biomassa acima do solo em floresta tropical sazonalmente seca. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 2023.
- DONATO, D. C. *et al.* Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. **Nature geoscience**, v. 4, n. 5, p. 293-297, 2011.

HOWARD, J. *et al.* Coastal Blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses. **Arlington: Conservation International**, 2014.

HUNT Jr.; E. R.; DAUGHTRY, C. S. T. What good are unmanned aircraft systems for agricultural remote sensing and precision agriculture? **International journal of remote sensing**, v. 39, n. 15-16, p. 5345-5376, 2018.

MENEZES, G.O.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; CINTRÓN, G. Recuperação de manguezais: um estudo de caso na Baixada Santista de São Paulo, Brasil. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 9, n. 1, p. 67-74, 2005.

MENGHINI, R. P. *et al.* Restauração ecológica de Manguezais. **Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) Atlas dos Manguezais do Brasil**, p. 95-104, 2018.

MOSCATELLI, M.; ALMEIDA, J. R. Reflorestamento de manguezais da Lagoa Rodrigo de Freitas. **SMAC – Secretaria Municipal de Meio Ambiente**, 1994.

PAIM, B. *et al.* **Estimativa de biomassa e carbono a partir de técnicas de sensoriamento remoto em área sob influência de empreendimentos termelétricos e mineração**. 2024. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024.

SILVA, I.P. *et al.* **A gestão dos manguezais nas unidades de conservação do Rio de Janeiro frente às mudanças climáticas**. In: XXVI Encontro Latino-Americano de Iniciação Científica.; XXII Encontro Latino-Americano de Pós-Graduação ; XII Encontro de Iniciação à Docência, 2022, São José dos Campos. São José dos Campos: Universidade do Vale do Paraíba, 2022.

WOEBBECKE, D.M. *et al.* Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. **Transactions of the ASAE**, v. 38, n. 1, p. 259-269, 1995.

ARTIGOS- RESUMO

*Pesquisas em
biotecnologia
aplicadas à indústria*



Avaliação econômica de arboviroses: impacto sobre o ambiente ocupacional brasileiro

Fernanda Caroline Tavares de Melo¹⁷, Leon de Franca Nascimento¹⁸

Resumo

Objetivo: Estimar os impactos econômicos das arboviroses sobre os sistemas de saúde e previdenciário do país, bem como dimensionar seus efeitos sobre a produtividade laboral. **Métodos:** Análise retrospectiva de dados secundários minerados do Sistema de Informação de Agravos de Notificação, Sistema de Informações Hospitalares e Instituto Nacional do Seguro Social, abrangendo o período de 2001 a 2023. A população foi composta por brasileiros de todas as faixas etárias e de ambos os sexos que utilizaram os serviços públicos de saúde com registro de diagnóstico primário de Dengue, Chikungunya, Zika e Febre Amarela. **Resultados:** A dengue respondeu por 90% dos 14,3 milhões de casos notificados, com mais de 1 milhão de internações, aproximadamente 8 mil óbitos e um custo hospitalar superior a R\$ 330 milhões. Com média de dias de afastamento por auxílio-doença vinculado às arboviroses estimada entre 932 dias, 40% dos benefícios foram destinados à indivíduos em idade produtiva, concentrando-se nas faixas etárias de 21 a 49 anos. **Conclusão:** A significativa perda de produtividade associada às arboviroses, sobretudo em populações em idade ativa, compromete o desempenho das empresas e a estabilidade financeira dos trabalhadores.

Palavras-chave: Arboviroses. Dengue. Redução de custos. Saúde ocupacional.

Abstract

Objective: To estimate the economic impact of arboviruses on the country's health and social security systems and to assess their effects on labor productivity. **Methods:** A retrospective analysis of secondary data extracted from the Notifiable Diseases Information System (SINAN), the Hospital Information System (SIH), and the National Social Security Institute (INSS), covering the period from 2001 to 2023. The study population comprised Brazilians of all age groups and both sexes who accessed public health services with a primary diagnosis of dengue, chikungunya, Zika, or yellow fever. **Results:** Dengue accounted for 90% of the 14.3 million reported cases, with more than 1 million hospitalizations, approximately 8,000 deaths, and hospital costs exceeding R\$ 330 million. The average work absence due to arbovirus-related illness was estimated at 932 days, with 40% of the benefits granted to individuals of productive age, predominantly between 21 and 49 years. **Conclusions:** The significant productivity losses associated with arboviruses, particularly among working-age individuals, threaten business performance and the financial security of workers.

Keywords: Arbovirus infections. Dengue. Cost savings. Occupational health.

¹⁷ Pesquisadora QMS II, Centro de Inovação SESI em Saúde Ocupacional. femelo@firjan.com.br

¹⁸ Coordenador de PD&I, Centro de Inovação SESI em Saúde Ocupacional. lednascimento@firjan.com.br

Introdução

As doenças transmitidas pelo mosquito *Aedes aegypti* geram impactos significativos sobre a atividade industrial no Brasil, especialmente no que diz respeito à produtividade dos trabalhadores. Em 2016, ano em que o país registrou o grande número de casos de arboviroses, cerca de 79,2% das indústrias relataram afastamentos de funcionários em decorrência de Dengue, Chikungunya e Zika Vírus, com redução estimada de 42,3% na produtividade (FIEP, 2017). O Brasil também se destaca negativamente no cenário continental quanto aos custos relacionados ao manejo e tratamento da Dengue, concentrando aproximadamente 42% de todos os gastos com a doença nas Américas (BRASIL, 2016). Ainda que a maioria dos pacientes evolua para a recuperação total após a fase aguda, alguns sintomas podem persistir e comprometer sua capacidade de trabalho, para além de casos que podem levar a incapacidades permanentes (BRASIL, 2016).

O Centro de Inovação SESI em Saúde Ocupacional (CIS-SO) atua em frentes de pesquisa que vão desde a biologia molecular até a aplicação de tecnologias de *Big Data*, com o propósito de desenvolver soluções que promovam a saúde, segurança e produtividade dos trabalhadores brasileiros. Inserido nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo estimar os impactos econômicos das arboviroses sobre os sistemas de saúde e previdenciário do país, bem como dimensionar seus efeitos sobre a produtividade laboral. Os dados levantados podem fornecer base teórica para ações de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I), para além de intervenções preventivas ou soluções aplicáveis à realidade industrial brasileira, especialmente em setores com alta exposição a riscos ambientais.

Desenvolvimento e resultados

Metodologia

Estudo descritivo, com análise de dados epidemiológicos relacionados à morbidade, produção hospitalar e benefícios previdenciários, obtidos a partir das bases de dados do Sistema de Informação de Agravos de Notificação (SINAN), Sistema de Informação Hospitalar (SIH), e Instituto Nacional do Seguro Social (INSS), abrangendo o período de janeiro de 2001 a janeiro de 2023. A população foi composta por brasileiros de todas as faixas etárias e de ambos os sexos que utilizaram os serviços públicos de saúde com registro de diagnóstico primário de Dengue (CID A90, A91), Chikungunya (CID A92.0), Zika (CID A92.8, U06) e Febre Amarela (CID A95.0, A95.1, A95.9).

Foram consideradas as seguintes variáveis: número de casos notificados, internações, óbitos, taxa de mortalidade, custos para o sistema de saúde, benefícios previdenciários concedidos, custos previdenciários, despesas com o combate ao vetor, afastamentos por motivo de doença, perda de produtividade e indicadores de produtividade (DALYs, QALYs, PALYs).

Após o processo de mineração e tratamento dos dados, foram realizadas análises exploratórias de *Big Data*, incluindo a construção de indicadores, e geração de gráficos e mapas para uma visualização mais clara dos resultados. Foram observadas medidas de tendência central e dispersão para variáveis numéricas, e frequências absolutas e relativas para variáveis categóricas. Todos os dados foram estratificados por unidade federativa (UF) para identificação de possíveis padrões regionais. As análises foram realizadas no software Python, com auxílio de ferramenta ArcGIS para mapeamento geográfico. Todos os dados utilizados são de domínio público e foram analisados de forma anonimizada.

Resultados e discussões

Ao se considerar uma análise agregada dos casos notificados de arboviroses, do total de 14,3 milhões de registros entre janeiro de 2001 e janeiro de 2023, 12,9 milhões (90%) correspondem a casos de Dengue, com quase 8 mil óbitos atribuídos à doença no período. Em relação à distribuição etária, Dengue, Zika e Chikungunya apresentaram padrões semelhantes, com maior concentração de casos entre pessoas de 20 a 39 anos, faixa considerada produtiva. A Febre Amarela, por sua vez, mostrou uma distribuição mais ampla, com predominância de casos entre 40 e 49 anos.

No caso específico da Dengue, identificaram-se mais de 14,3 milhões de notificações ao longo das duas décadas analisadas, com aproximadamente 1,1 milhão de internações. A Região Norte apresentou a maior taxa de mortalidade hospitalar (número de óbitos das internações), seguida pelo Nordeste, tendo as regiões Centro-Oeste e Norte apresentado maiores taxas de internação e óbitos por 100 mil habitantes (963,26 e 885,48, respectivamente). Observou-se ainda uma tendência de aumento da taxa de mortalidade por Dengue em ambos os sexos ao longo do tempo.

A análise dos custos per capita do sistema de saúde revelou que os estados com maiores taxas de internação por 100 mil habitantes (Rondônia, Piauí e Goiás) também apresentaram os maiores gastos. Em contraste, as Regiões Sudeste e Sul, que concentram maior número de médicos e hospitais especializados, registraram os menores percentuais de despesa. No total, os custos com internações e hospitalizações por Dengue totalizaram R\$ 330,4 milhões, com um custo médio estimado de R\$ 351,66 por pessoa, considerando uma média de três dias de internação.

No que diz respeito à Chikungunya, foram registrados mais de 500 mil novos casos entre os anos de 2016 e 2019. Tendo a mortalidade associada à doença apresentado tendência de queda de 2016 a 2018, com um leve aumento percebido em 2019.

Em 2016, ano com maior número de casos (281 mil) e 123 óbitos registrados, os custos com atendimento médico e tratamento da Chikungunya alcançaram R\$ 83 milhões, com maiores gastos registrados pelos estados do Ceará e São Paulo. Ainda nesse ano, estima-se que a perda de produtividade associada a afastamentos e sequelas da doença tenha gerado um impacto de R\$ 124 milhões (equivalente a 29% dos custos totais com as quatro arboviroses analisadas). Pela sua capacidade de gerar artralgias persistentes, o adoecimento por Chikungunya pode implicar na diminuição da capacidade funcional dos indivíduos em idade produtiva.

Quanto ao Zika vírus, entre 2016 e 2019 foram notificados mais de 83 mil casos, concentrados principalmente nos estados do Ceará, Rio de Janeiro e Rio Grande do Norte. Partindo da associação já comprovada entre infecção pelo Zika vírus e microcefalia e Síndrome de Guillain-Barré, segundo dados do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, estima-se que os custos diretos e indiretos (envolvendo diagnóstico, cuidados médicos e tratamento) dessas condições tenham alcançado aproximadamente USD 4 bilhões, sendo o Brasil responsável por cerca de 35% desse total, arcando com a maior parte dos custos na América do Sul considerando o período epidêmico entre 2015 e 2017 (PNDU, 2017).

O Sistema de Seguridade Social brasileiro contempla dois grandes grupos de benefícios, os de caráter temporário e os permanentes. Em 2022, duas arboviroses (Dengue e Chikungunya) foram responsáveis por cerca de 90% dos afastamentos previdenciários relacionados a arboviroses no país. Dentre os benefícios concedidos, apenas um terço teve caráter temporário, predominantemente vinculados a casos de Chikungunya. Os demais, dois terços, foram motivados por quadros de dengue, com capacidade expressiva de gerar afastamentos permanentes.

Em dezembro de 2022, a média de dias de afastamento por auxílio-doença vinculado às arboviroses foi de 932 dias, sendo observado, para os benefícios permanentes, uma duração corrente média de 4.100 dias. Aproximadamente 40% desses casos ocorreram em indivíduos em idade produtiva, concentrando-se nas faixas etárias de 21 a 49 anos. Quando um trabalhador dessa faixa é afastado, as empresas enfrentam dois cenários possíveis: a necessidade de acionar horas extras para compensar a ausência, o que implica aumento de custos, ou a contratação de um novo funcionário, que pode demandar tempo de adaptação ou apresentar produtividade inferior, gerando novos impactos financeiros.

Pretendendo quantificar o impacto de um caso hipotético de arbovirose, a partir da análise dos custos relacionados a internações, medicamentos, dias de trabalho perdidos durante o período de hospitalização e afastamentos previdenciários, o Quadro 1 sintetiza os custos diretos (gastos com medicamentos e internações) e indiretos (perda de produtividade, considerando afastamentos de mão de obra ativa, considerando salário médio nacional – valor aproximado de R\$ 2.900,00 (IPEA, 2023)).

Quadro 1. Custos diretos e indiretos para um caso de arbovirose

Custos Diretos	Custos Indiretos
R\$ 20 a R\$ 100 com medicamentos sintomáticos (fase aguda)	[R\$ 310,71 a R\$ 725,00] 3 a 7 diárias de salário perdidas durante a internação
R\$ 351,66 em caso de internação hospitalar (casos graves, SUS)	[R\$ 96.528,57] Até 932 dias de afastamento em casos de auxílio-doença
	[R\$ 424.642,85] Em caso de afastamentos permanentes da força de trabalho
Casos leves: Estimamos um custo de R\$ 240,75 (sem internação, um dia off) a R\$ 1.175,00 por caso (3 dias internado)	
Casos graves: Podem chegar a centenas de milhares de reais, dependendo do afastamento	

Fonte: elaborado pelos autores

Conclusão

Os resultados apresentados evidenciam o amplo impacto das arboviroses não apenas sobre os sistemas de saúde e previdência social, mas também sobre a produtividade da força de trabalho brasileira. A alta incidência de Dengue, Chikungunya e Zika, associada a elevados índices de internações, óbitos e afastamentos, representa um custo expressivo tanto para o setor público quanto para o setor produtivo.

Neste contexto, a significativa perda de produtividade associada às arboviroses, sobretudo em populações em idade ativa, compromete o desempenho das empresas e a estabilidade financeira dos trabalhadores. Sendo evidente a existência de carências nas estratégias de controle, novas estratégias e planos de ação precisam ser tomados pela sociedade civil e governo para controlar as arboviroses no Brasil. Para além, dentro do setor industrial, tais achados apontam para a importância de adoção de medidas de prevenção, gestão de afastamento ou desenvolvimento de ações integradas junto ao Sistema Único de Saúde (SUS) no tocante à temática.

Por fim, destacamos algumas limitações do presente estudo que devem ser consideradas na interpretação dos achados. O uso de dados secundários do SUS impõe restrições relevantes, como a subnotificação de casos, além de limitações quanto à qualidade e à disponibilidade das informações. Considerando que muitos trabalhadores não acessam os sistemas formais mesmo quando adoecem, os valores estimados podem representar uma subestimativa do real impacto das arboviroses na população brasileira.

Referências

DURAND, L.; GENOVEZ, V.; ARAUJO, D. V. Cost Effectiveness of Dengue Vaccination in Brazil. **Value in Health**, v. 19, n. 3, p. A217, 2016.

Federação das Indústrias do Estado de Pernambuco – FIEPE. **Impactos do Aedes aegypti na indústria pernambucana**. Recife, 2017.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. **Massa salarial – Carta de conjuntura**. Brasília, 2022.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Departamento de Vigilância das Doenças Transmissíveis. **Dengue: diagnóstico e manejo clínico: adulto e criança**. 5. ed. Brasília: Ministério da Saúde, 2016.

OZAWA, S. *et al.* Estimated economic impact of vaccinations in 73 low- and middle-income countries, 2001–2020. **Bulletin of the World Health Organization**, v. 95, n. 9, p. 629, 2017.

Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD). **Relatório de desenvolvimento humano**. Brasília: PNUD, 2017.

Produção de óleo a partir de microalga como novo ingrediente para a fabricação de produtos cárneos "plant based"¹⁹

Tácila Oliveira Pinto de Freitas²⁰, Wendel Batista da Silveira²¹, Anita Ferreira do Valle²²

Resumo

Empresas de biotecnologia têm investido em novas tecnologias para atender às demandas alimentícias, utilizando microalgas como fonte alternativa de ingredientes. Esses organismos oferecem vantagens como menor uso de solo e água, capacidade de sequestrar CO₂ e produção de bioinsumos valiosos. Esta pesquisa busca obter óleos de microalgas com alto teor de saturação e presença de ácidos graxos poli-insaturados, como o ômega, visando o desenvolvimento de novos alimentos cárneos *plant-based*. Inicialmente, realizou-se uma prospecção biotecnológica para identificar as espécies com maior potencial de produção lipídica. Em seguida, foi iniciado o cultivo em laboratório da microalga selecionada, que posteriormente será implementada em escala industrial do tipo *raceway*. Para otimizar o processo, foi utilizado um delineamento composto central (DCC), avaliando variáveis como injeção de CO₂, fornecimento de nitrogênio e concentração de glicose no meio de cultivo, com todos os testes realizados em triplicata, incluindo os controles. A condição ideal de cultivo para produção lipídica será escalonada para cultivo em larga escala, seguida da extração do óleo da microalga. Esses lipídios serão usados na fabricação de novos produtos cárneos *plant-based*, promovendo benefícios à saúde e contribuindo para a redução de gases de efeito estufa, representando uma alternativa sustentável à gordura animal.

Palavras-chave: Plant-based. Microalgas. Prospecção biotecnológica. Lipídeos.

32

Abstract

Biotechnology companies have been investing in new technologies to meet food demands by using microalgae as an alternative source of ingredients. These organisms offer advantages such as lower land and water usage, the ability to sequester CO₂, and the production of valuable bioinputs. This research aims to obtain microalgal oils with a high saturation level and the presence of polyunsaturated fatty acids, such as omega, for the development of new plant-based meat products. Initially, a biotechnological prospecting was conducted to identify species with the highest lipid production potential. Then, laboratory cultivation of the selected microalga was initiated, which will later be scaled up to an industrial-level raceway system. To optimize the process, a Central Composite Design (CCD) was used, evaluating variables such as CO₂ injection, nitrogen supply, and glucose concentration in the culture medium, with all tests conducted in triplicate, including controls. The optimal cultivation conditions for lipid production will be scaled up for large-scale cultivation, followed by the extraction of oil from the microalga. These lipids will be used in the production of new plant-based meat products, promoting health benefits and contributing to greenhouse gas reduction, representing a sustainable alternative to animal fat.

Keywords: Plant-based. Microalgae. Biotechnological prospecting. Lipids.

19 Agradecimentos: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade Federal de Viçosa, FINEP.

20 Pós-doc. Programa de Pós-Graduação em Ciências de Alimentos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Química, Laboratório de Estudos Aplicados em Fotossíntese, Centro de Tecnologia, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro -RJ. tacilapfreitas@gmail.com

21 Professor. Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Microbiologia, Laboratório de Fisiologia de Microrganismos, Instituto de Biotecnologia Aplicada à Agropecuária, Viçosa - MG. wendel.silveira@ufv.br

22 Professora. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Química, Laboratório de Estudos Aplicados em Fotossíntese, Centro de Tecnologia, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro - RJ. avall@iq.ufrj.br

Introdução

Com o aumento populacional, estima-se que a demanda por alimentos crescerá 70% até 2050 em relação a 2006 (Ranganathan *et al.*, 2016). O Brasil acompanha essa tendência com o conceito de "intensificação sustentável", porém um dos grandes desafios é desenvolver substitutos para a gordura animal que mantenham sabor, aroma e textura atrativos (Davis *et al.*, 2016). Nesse contexto, as microalgas surgem como uma alternativa promissora, pois algumas espécies são capazes de acumular lipídios ricos em ácidos graxos saturados e poli-insaturados, como ômega-3 e ômega-6 (Maltsev *et al.*, 2021).

A produtividade média de lipídios da *Chlorella vulgaris* varia conforme as condições de cultivo e os protocolos experimentais. Em estudos realizados sob condições controladas, a produtividade de lipídios foi observada entre 77,1 e 121 mg/L/dia, dependendo das variáveis como intensidade de luz, composição do meio de cultivo e estratégias de indução (Mujtaba *et al.*, 2012). Em Cunha *et al.* (2023), a produtividade de lipídios foi de 26,2 mg/L/dia sob condições de controle, enquanto sob estresse induzido por peróxido de hidrogênio, a produtividade aumentou para 70,4 mg/L/dia. Além disso, em experimentos realizados em fotobiorreatores de camada fina, a *Chlorella vulgaris* demonstrou uma produtividade de lipídios de até 1,5 g/L/dia em condições de limitação de nutrientes (Pribyl *et al.*, 2012).

Condições de cultivo adequadas e uma composição de meio apropriada trazem desafios técnicos e altos custos de produção e manutenção dos biorreatores. Além disto, cultivos microbiológicos requerem controle fisiológico rigoroso e infraestrutura especializada. E, há variabilidade na composição dos óleos entre espécies, o que dificulta a padronização e a competitividade com gorduras tradicionais. Tendo em vista estes desafios, a presente proposta tem como objetivo o desenvolvimento de uma prospecção tecnológica para o cultivo de microalgas oleaginosas e a produção de uma mistura de óleos com alto teor de saturação e presença de ácidos graxos poli-insaturados.

Desenvolvimento e resultados

Metodologia

Para alcançar o objetivo, duas etapas foram propostas: I) prospecção tecnológica do uso de microalgas para produção de óleos alimentícios e seleção de linhagens com alto potencial lipídico; e, ainda a ser executada a II) otimização das condições físico-químicas do cultivo em escala laboratorial e posterior escalonamento (50L a 5000L) e extração dos lipídios.

Fase Prospectiva

Consistiu na busca de artigos científicos com o objetivo de mapear o estado da arte relacionado à produção e uso de óleos vegetais extraídos de microalgas na indústria alimentícia. Para isso, foi utilizada a base de dados *Scopus* (<http://www.scopus.com/>). A pesquisa foi limitada ao período de janeiro de 2019 a junho de 2024. As palavras-chave utilizadas foram: "microalgae; oil; lipid; fatty acid; saturated oil; food; trends e perspective".

Fase Laboratorial

Serão empregados planejamentos experimentais (delineamento composto central – DCC) para identificar as melhores condições de cultivo que maximizem a produção de óleos saturados (injeção de CO₂ (0 a 4%, 0,5 v/v/m) concentração de nitrogênio e glicose no meio). Após, será iniciado o escalonamento para volumes progressivamente maiores. Os métodos tradicionais de extração - Bligh e Dyer (1959) e de Folch (Folch *et al.*, 1957) - fazem uso dos solventes tóxicos clorofórmio/metanol, por isso grande parte das modificações propostas visa substituí-los por solventes mais seguros ou ambientalmente sustentáveis. Neste trabalho, a extração dos lipídios será feita com metanol/hexano, 1:6. O perfil de ácidos graxos será determinado por cromatografia gasosa.

Resultados e discussões

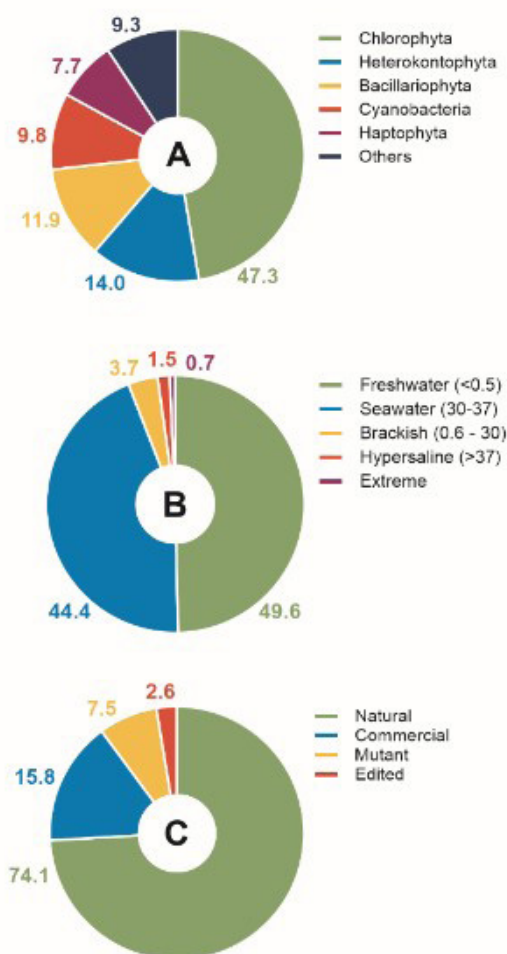
Alterações na disponibilidade de nutrientes podem induzir mudanças metabólicas que favorecem o acúmulo de lipídios ou outros compostos de valor comercial. Alterações no meio foram relatadas em 62 das 168 publicações nas quais o meio utilizado foi mencionado (Tabela 1).

Tabela 1. Número total e percentual de publicações científicas por tratamento de meio de cultivo encontrados nos resultados da pesquisa.

Growth medium treatment	No. of publications	%
Nutrient supplementation	27	43.5
Nutrient starvation	27	43.5
Nutrient limitation	8	12.9

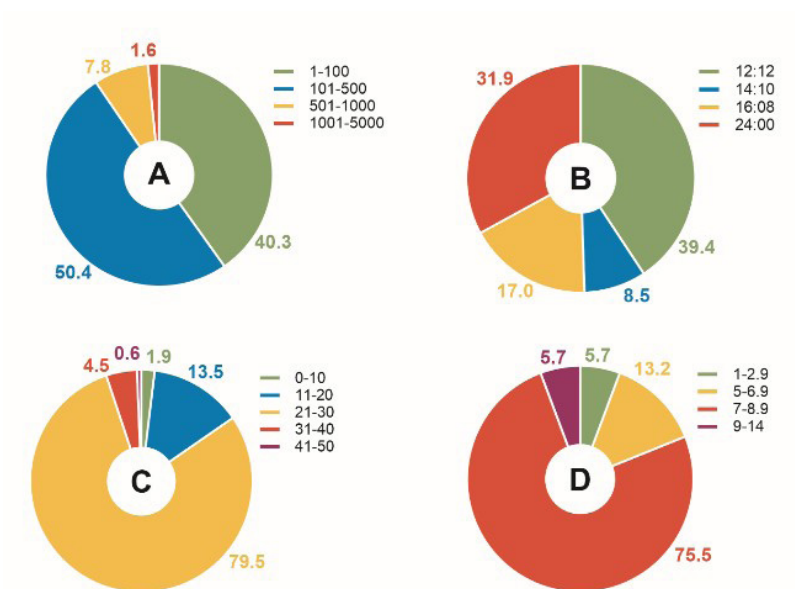
A predominância do filo Chlorophyta, presente em 47,3% das publicações, demonstra que as algas verdes são o grupo mais estudado para a produção de lipídios (Figura 1). As condições experimentais de cultivo das microalgas relatadas pela prospecção são mostradas abaixo:

Figura 1. Distribuição percentual das microalgas utilizadas nas publicações com base em (A) grupo, (B) ambiente de origem e (C) estratégia de seleção.



Fonte: Scopus.

Figura 2. Distribuição percentual das condições de cultivo utilizadas nas publicações com base em (A) intensidade luminosa, (B) fotoperíodo, (C) temperatura e (D) pH.

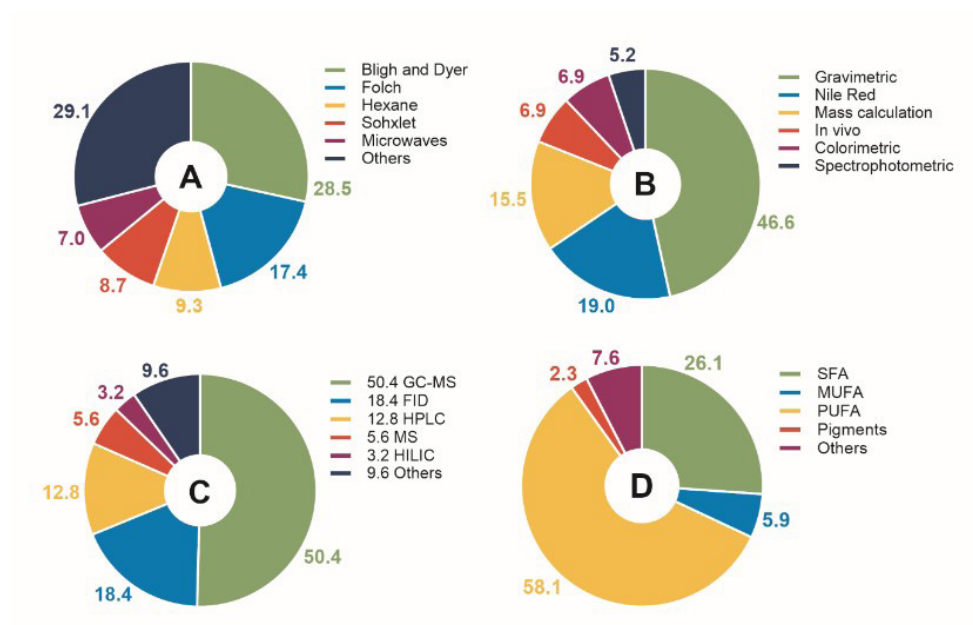


Fonte: Scopus.

Foram registradas temperaturas de cultivo de 6 a 45°C. Das 149 publicações que mencionaram essa condição, 79.4% dos estudos utilizaram temperaturas entre 21 e 30°C, enquanto outros 13.4% utilizaram temperaturas entre 11 e 20°C (Figura 2C). Foram registradas 53 ocorrências de valores de pH, dos quais 75.5% são valores encontrados entre 7 e 8.9 (Figura 2D).

As técnicas mais comumente utilizadas para extração de lipídios estão relacionadas ao uso de diferentes solventes, como hexano e álcool, mas destaca-se a combinação de metanol e clorofórmio, descrita como parte do método de Bligh e Dyer e do método de Folch (Figura 3A).

Figura 3. Distribuição percentual do processamento lipídico utilizado nas publicações com base em (A) método de extração, (B) método de quantificação, (C) método de caracterização e (D) classe lipídica.



Fonte: Scopus.

Os ácidos graxos saturados (SFA) representaram 26,1% do total de registros de componentes lipídicos (Figura 3D). Esse grupo é importante para a indústria alimentícia por possuírem propriedades de estabilidade térmica e oxidativa, o que garante uma maior vida útil dos produtos alimentícios processados. Os lipídios pertencentes à classe ômega (Ômega 3, 6 e 9) correspondem a mais de 50% das menções observadas, destacando-se ainda o Ômega 3, que sozinho contribui com 26.6% das menções. Essa classe lipídica despertou o interesse da indústria devido aos benefícios à saúde associados ao seu consumo, principalmente na prevenção de doenças cardiovasculares e no combate a inflamações.

Conclusão

Os resultados destacam a importância das microalgas como uma solução biotecnológica promissora para a produção de lipídios na indústria alimentícia. As Chlorophyta, algas verdes, se destacam como o grupo mais utilizado para a produção de lipídios nas publicações científicas.

Referências

BLIGH, E. G.; DYER, W. J. A rapid method of total lipid extraction and purification. **Canadian journal of biochemistry and physiology**, v. 37, n. 8, p. 911-917, 1959.

BREIL, C. *et al.* Bligh and Dyer" and Folch methods for solid-liquid-liquid extraction of lipids from microorganisms. Comprehension of solvation mechanisms and towards substitution with alternative solvents. **International journal of molecular sciences**, v. 18, n. 4, p. 708, 2017.

CUNHA, A. E. *et al.* Chlorella vulgaris growth, pigment and lipid accumulation: effect of progressive light and hydrogen peroxide exposure. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 98, n. 2, p. 442-450, 2023.

DAVIS, K. F. *et al.* Meeting future food demand with current agricultural resources. **Global Environmental Change**, v. 39, p. 125-132, 2016.

FOLCH, J.; LEES, M.; STANLEY, G. S. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues. **Journal of biological chemistry**, v. 226, n. 1, p. 497-509, 1957.

MALTSEV, Y.; MALTSEVA, K. Fatty acids of microalgae: Diversity and applications. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 20, n. 2, p. 515-547, 2021.

MUJTABA, G. *et al.* Lipid production by Chlorella vulgaris after a shift from nutrient-rich to nitrogen starvation conditions. **Bioresource technology**, v. 123, p. 279-283, 2012.

PEÑA-JORQUERA, A. *et al.* Consumer behavior towards plant-based foods: The case of plant-based meat analogues in Brazil. **Journal of Consumer Studies**, v. 47, p. 456-468, 2023.

PŘIBYL, P.; CEPÁK, V.; ZACHLEDER, V. Production of lipids in 10 strains of Chlorella and Parachlorella, and enhanced lipid productivity in Chlorella vulgaris. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 94, n. 2, p. 549-561, 2012.

RANGANATHAN, J. *et al.* Shifting Diets for a Sustainable Food Future. **Global Food Policy Report**, cap. 8, p. 66-79, 2016.

Metodologias alternativas para extração do corante azul natural Ficocianina para aplicação industrial em bebidas²³

Raphael de Oliveira Ribeiro²⁴, Moisés Geraldelli²⁵, Marianna Alves Queiroz²⁶, Anita Ferreira do Valle²⁷

Resumo

Microalgas são algumas das principais fontes de extração de corantes naturais, como a C-ficocianina, importante alternativa aos corantes sintéticos azuis utilizados na indústria. Essa ficobiliproteína, uma vez extraída, tem aplicação como aditivo natural, sendo um pigmento azul, natural e atóxico com potencial para produção industrial. Sua faixa de estabilidade de pH (5,0-8,0) e temperatura (<40°C) justificam estudos avaliando sua aplicação em condições adversas. Este trabalho tem como objetivos avaliar metodologias de extração de C-ficocianina proveniente de cultivo em escala piloto de *Arthrospira sp.*, assim como desenvolver e otimizar estratégias visando a aplicação de C-ficocianina em bebidas carbonatadas com pH 3,0. A partir de prospecções tecnológicas, definiu-se a avaliação das metodologias alternativas de extração (*freeze-thaw*, ultrassom e autólise) e estabilização do corante em matrizes ácidas (hidrólise enzimática, microencapsulação e aditivos), utilizando análise de superfícies de resposta e perfis de desejabilidade para otimização de parâmetros. A estratégia de hidrólise enzimática viabilizou a aplicação do corante em matriz ácida, enquanto que a autólise apresenta potencial de obtenção de C-ficocianina com maior concentração e pureza aparente quando comparada com a estratégia de *freeze-thaw*. Análises adicionais relacionadas a termoestabilidade, análise proteômica e escalonamento industrial da extração apresentarão caminhos viáveis para a produção industrial de C-ficocianina.

Palavras-chave: *Arthrospira maxima*. Ficocianina. Bebidas ácidas. Métodos de extração.

Abstract

Microalgae are among the main sources for the extraction of natural dyes, such as C-phycoyanin, an important alternative to synthetic blue dyes used in industry. This phycobiliprotein, once extracted, has applications as a natural additive, being a blue, natural, and non-toxic pigment with potential for industrial production. Its pH (5.0–8.0) and temperature (<40°C) stability range justifies studies assessing its application under adverse conditions. This study aims to evaluate extraction methodologies of C-phycoyanin obtained from pilot-scale cultivation of *Arthrospira sp.*, as well as to develop and optimize strategies for the application of C-phycoyanin in carbonated beverages with pH 3.0. Based on technological prospecting, alternative extraction methods (*freeze-thaw*, ultrasound, and autolysis) and dye stabilization in acidic matrices (enzymatic hydrolysis, microencapsulation, and additives) were evaluated using response surface analysis and desirability profiles for parameter optimization. The enzymatic hydrolysis strategy enabled the application of the dye in acidic matrices, while autolysis possibly leads to higher concentration and purity of C-phycoyanin when compared to the *freeze-thaw* strategy. Additional analyses related to thermal stability, proteomic analysis, and industrial-scale extraction will provide feasible pathways for the industrial production of C-phycoyanin.

Keywords: *Arthrospira maxima*. Phycocyanin. Acid beverages. Extraction methods.

-
- 23 Os autores agradecem ao programa PIBITI/CNPQ pelas bolsas de Iniciação de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, bem como à CAPES e FAPERJ pelas bolsas de mestrado ao longo do projeto.
24 Mestrando do PPGCAL, Instituto de Química da UFRJ. rapha.o.r16@gmail.com
25 Graduando, Instituto de Biologia da UFRJ. moisesgeraldelli@gmail.com
26 Graduando, Instituto de Química da UFRJ. mariannaalqz@gmail.com
27 Professora Associada, Instituto de Química da UFRJ. avalor@iq.ufrj.br

Introdução

As microalgas constituem um dos mais eficientes sistemas biológicos de transformação de energia solar em compostos orgânicos através do processo fotossintético. Além de envolver enorme diversidade de formas e funções ecológicas, como no ambiente aquático, esses organismos também são aproveitados em atividades econômicas, com uma grande versatilidade de aplicações biotecnológicas atribuída a eles. Na área de bioenergia, as microalgas têm sido alvo de inúmeros estudos nos últimos anos para a produção de biocombustíveis (Li *et al.*, 2015; Chisti, 2007; Singh *et al.*, 2010) e outros lipídeos como os ácidos graxos poliinsaturados (PUFAs), como os ômega-3 e ômega-6 (Koller *et al.*, 2014). Os pigmentos constituem outro grupo de biomoléculas com alto valor de mercado que podem ser extraídos a partir de sua biomassa, sendo considerados como os produtos de maior potencial para o sucesso comercial em um futuro próximo (Spolaore *et al.*, 2006; Rao *et al.*, 2007; Granado-Lorencio *et al.*, 2009).

Com relação à produção de pigmentos, destaca-se o gênero *Arthrospira sp.*, um grupo de cianobactérias capazes de produzir até 20% da sua biomassa em pigmentos da classe das ficobiliproteínas (Stanic-Vucinic *et al.*, 2018). Esse grupo de proteínas hidrossolúveis apresenta-se em microalgas nas formas de: ficocianina, ficoeritrina e aloficocianina e estão localizadas nos ficobilissomas – estruturas celulares das membranas tilacóides do cloroplasto que auxiliam o processo fotossintético desses organismos (Osório *et al.*, 2020). Um grande número dos estudos envolvendo ficobiliproteínas têm como enfoque a C-ficocianina (CPC), um pigmento de cor azul vibrante (absorção máxima entre 610-640 nm) e fluorescente que possui como cromóforo uma cadeia de tetrapirróis lineares que interagem com as subunidades alfa e beta dessa proteína por meio de ligações tioéster com resíduos de cisteína (Choi *et al.*, 2018; Maccoll, 1998; Antelo, 2007; Roda-Serrat *et al.*, 2018). Esses estudos investigam, entre outras aplicações, seu uso como biocorante em alimentos (Amarante *et al.*, 2020; García *et al.*, 2021), cosméticos e maquiagens (Kraseasintra *et al.*, 2022; Kuddus *et al.*, 2013), e, também, em ensaios imunológicos, utilizando suas propriedades fluorescentes (Zheng *et al.*, 2018). Há, ainda, estudos explorando propriedades terapêuticas do pigmento, investigando efeitos anti-inflamatórios, antioxidantes e anti-carcinogênicos (Rimbau *et al.*, 2001; Mahendran *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2021; Soror *et al.*, 2022).

Outra categoria com um grande número de estudos envolvem a estabilidade de CPC em condições não ideais de temperatura, acidez e luminosidade (Fernandes *et al.*, 2023). Isso se deve ao fato de que essa molécula, sendo uma proteína, possui uma faixa de pH (5,0-8,0) e temperatura (< 40°C) que garantem uma conformação para sua maior solubilidade (Adjali *et al.*, 2022), sendo o grande foco dessas pesquisas permitir sua aplicação ou estabilidade fora dessas condições ideais. Apesar de grande parcela desses ensaios observar a estabilidade térmica do pigmento, existe grande interesse na estabilidade em pH ácido, especialmente na indústria alimentícia, onde matrizes de pH alcalino são raras ocorrências (Li *et al.*, 2022).

Dessa forma, o presente projeto tem como objetivo geral a avaliação de metodologias de extração de CPC proveniente de cultivo em escala piloto de *Arthrospira sp.*, assim como desenvolver e otimizar estratégias visando a aplicação de CPC em bebidas carbonatadas com pH 3,0, em parceria com a empresa AMBEV S.A. Será utilizada uma abordagem proteômica para identificação *in silico* de peptídeos bioativos nas bebidas visando sua caracterização como bebidas funcionais, assim como o estudo de viabilidade econômica dos processos de extração investigados.

Desenvolvimento e resultados

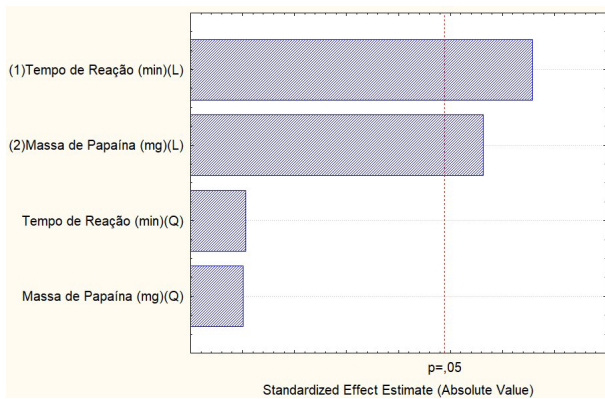
Metodologia

Uma vez finalizada a prospecção tecnológica para determinar as potenciais estratégias alternativas para estabilização do pigmento em matrizes ácidas, iniciaram-se análises preliminares avaliando qualitativamente as estratégias de microencapsulação com quitosana (Gustiningtyas *et al.*, 2020), hidrólise ácida (TCA 25% por 1, 2, 3 e 4 horas a 37°C), alteração da força iônica com diferentes sais e açúcares (NaCl, CaCl₂, MgSO₄, glicose e sorbitol) e hidrólise enzimática. Todas, excetuando a hidrólise enzimática, não apresentaram resultados promissores que justificassem sua continuação no estudo. Assim, utilizando pepsina e papaína, foram realizados diferentes planejamentos experimentais com delineamento composto central (DCC) para otimizar os parâmetros de tempo de reação e proporção enzima: CPC para as respostas de concentração de CPC e grau de pureza das amostras após a reação, ambos calculados por métodos espectrofotométricos (Bennet; Bogorad, 1978; Abalde *et al.*, 1998). Para garantir o sucesso da formulação de bebida carbonatada contendo o pigmento estabilizado há, ainda, outros fatores a serem ajustados. Nomeadamente, o tempo de prateleira desse produto que, contendo CPC, pode ter sua cor e outras propriedades afetadas, principalmente, pela temperatura de armazenamento e transporte. Para tal, foram avaliados aditivos termoprotetores (citrato de sódio e ácido cítrico), permitidos para adição no tipo de bebida em questão, a partir de DCC relacionando a concentração desses aditivos e o tempo de incubação com a concentração do corante após teste de estufa forçada, consistindo na incubação das amostras por 10 dias à 38°C, equivalendo-se a um tempo de prateleira de até 180 dias, segundo metodologia utilizada para testes de qualidade já aplicados na empresa parceira.

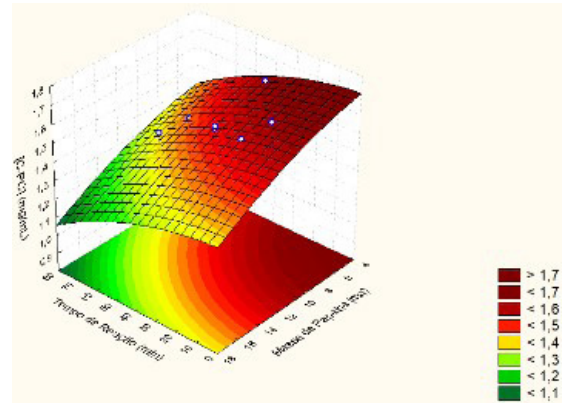
Resultados e discussões

Os principais resultados indicaram que, no caso da papaína, para a pureza não havia significância na alteração dos parâmetros, enquanto para a concentração, as melhores condições de reação foram com uma proporção de 2,67 mg de enzima para 10 mg de CPC por 30 minutos de reação à 37°C. Já para a pepsina, os resultados não revelaram significância para pureza ou concentração de CPC, justificando a seleção da papaína para a continuação do estudo. Para validação das condições observadas, foi realizada a técnica de SDS-PAGE para verificar o perfil das bandas das amostras de pigmento tratadas nessas condições. Desse experimento infere-se que há de fato a degradação das bandas características da C-ficocianina a partir de 30 minutos de reação, comparando os poços 2 e 4, garantindo a validação necessária.

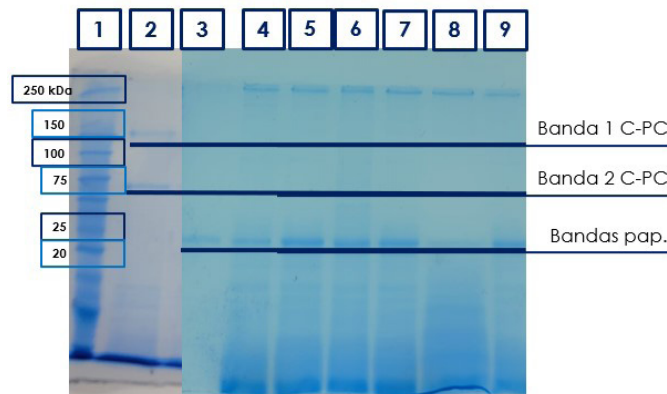
Figura 1: (A) Gráfico de Pareto e (B) superfície de resposta do tempo de reação (min) e da massa de papaína (g), expressos em função da concentração final de CPC (mg/mL). (C) Gel de poliacrilamida contendo 9 poços, sendo: 1 – padrão de massas moleculares; 2 – padrão de CPC; 3 – padrão de papaína; poços 4 a 9 – amostras de CPC digerida com papaína com tempo inicial de 30 minutos (poço 4), aumentando com incrementos de 30 minutos para cada poço subsequente (5 – 60, 6 – 90, 7 – 120, 8 – 150 e 9 – 180). Também são destacadas as bandas referentes aos padrões de CPC e papaína.



(A)



(B)

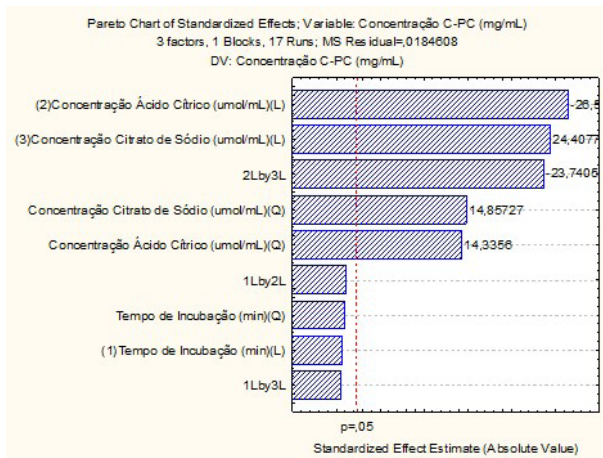


(C)

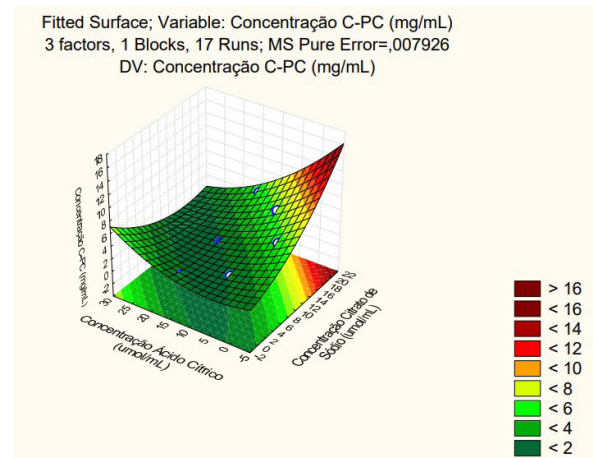
As próximas etapas dessa frente do projeto envolverão a análise proteômica das amostras digeridas na condição otimizada, visando obter dados de abundância de peptídeos gerados a fim de discriminar possível bioatividade da amostra em bebida, a partir de análise *in silico*.

Para o tempo de prateleira, os resultados indicaram que o parâmetro de tempo de incubação não foi significativo para a resposta avaliada, enquanto a concentração de ácido cítrico apresentou um efeito negativo e, enfim, que a concentração de citrato de sódio apresenta o melhor efeito termoprotetor nas amostras de bebida.

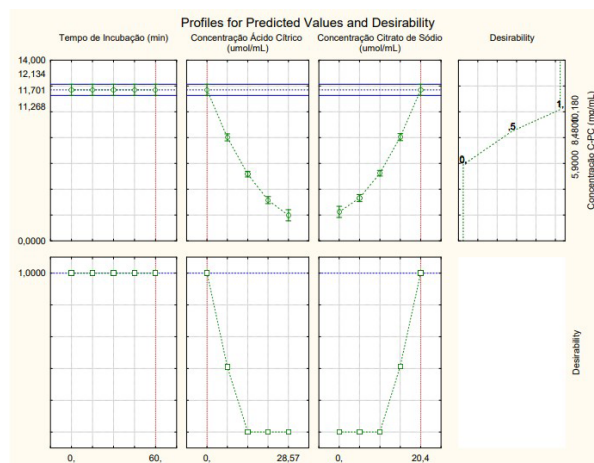
Figura 1: (A) Gráfico de Pareto, (B) superfície de resposta das concentrações de ácido cítrico e citrato, (C) e perfil de desejabilidade, expressos em função da concentração de CPC após o teste de estufa forçada.



(A)



(B)



(C)

Não obstante, o perfil sensorial da bebida adicionada de CPC, para além da coloração azul e das propriedades benéficas do pigmento, precisa manter-se o mesmo, ou com alterações desejadas, quando comparado com a bebida modelo ou ao longo do seu tempo de prateleira. Portanto, para avaliar possíveis mudanças nesse perfil, um grupo de avaliadores treinados determinará o perfil da bebida modelo da bebida adicionada do pigmento e da bebida adicionada do pigmento após o teste de estufa.

Com o objetivo de mitigar o custo energético e o tempo comumente relacionados aos métodos de extração de CPC, um experimento comparativo, utilizando metodologias obtidas a partir de prospecção tecnológica, será traçado em escala laboratorial e piloto. Para os métodos a serem comparados, foram selecionados o método de *freeze-thaw*, que em escala laboratorial possui o melhor rendimento e pureza, mas depende de 5 ciclos de 24 horas de congelamento para tal (Sarada *et al.*, 1999), bem como uso de ultrassom (Menegotto *et al.*, 2020) e autólise (Jung *et al.*, 2022). Após, será feita uma validação em escala piloto para, enfim, traçar o estudo de viabilidade econômica do método com a melhor performance.

Conclusão

Denota-se, portanto, que o uso do método inovador de hidrólise enzimática permitiu a estabilização de CPC em pH ácido, assim sendo, ampliando sua aplicação para a indústria de alimentos e, também, para demais aplicações em matrizes ácidas. O estudo da formulação do produto possibilitou vislumbrar estratégias que, não só aumentam o tempo de prateleira de produtos adicionados do pigmento, como expandem as possibilidades do uso processos térmicos moderados para tratamento e/ou aplicação de CPC. Enfim, espera-se que o estudo da viabilidade econômica da produção e aplicação desse pigmento caracterize novas formas eficientes e sustentáveis de obter essa biomolécula em escala piloto, desenvolvendo a implementação industrial das microalgas e suas moléculas de interesse.

Referências

ABALDE, J. *et al.* Purification and characterization of phycocyanin from the marine cyanobacterium *Synechococcus* sp. IO9201. **Plant Science**, v. 136, n. 1, p. 109-120, 1998.

ADJALI, A. *et al.* Physicochemical degradation of phycocyanin and means to improve its stability: A short review. **Journal of Pharmaceutical Analysis**, v. 12, n. 3, p. 406-414, 2022.

AMARANTE, M. *et al.* Analytical grade C-phycocyanin obtained by a single-step purification process. **Process Biochemistry**, v. 90, p. 215-222, 2020.

ANTELO, F. S. **Purificação de ficocianina de *Spirulina platensis* através de sistema aquoso bifásico e caracterização cinética da desnaturação térmica**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, 2007.

42 CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology advances**, v. 25, n. 3, p. 294-306, 2007.

CHOI, W. Y.; LEE, H. Y.W. Kinetic Analysis of Stabilizing C-Phycocyanin in the *Spirulina platensis* Extracts from Ultrasonic Process Associated with Effects of Light and Temperature. **Applied Sciences**, v. 8, n. 9, p. 1662, 2018.

BENNET, A. *et al.* Complementary chromatic adaptation in a filamentous blue-green alga. **The Journal of cell biology**, v. 58, n. 2, p. 419-435, 1973.

FERNANDES, R. *et al.* Exploring the Benefits of Phycocyanin: From *Spirulina* Cultivation to Its Widespread Applications. **Pharmaceuticals**, v. 16, n. 4, p. 592, 2023.

GARCÍA, A. *et al.* The application of a phycocyanin extract obtained from *Arthrospira platensis* as a blue natural colorant in beverages. **Journal of Applied Phycology**, v. 33, n. 5, p. 3059-3070, 2021.

GRANADO-LORENCIO, F. *et al.* **In vitro bioaccessibility of lutein and zeaxanthin from the microalgae *Scenedesmus almeriensis***. **Food Chemistry**, v. 114, n. 2, p. 747-752, 2009.

GUSTININGTYAS, A. *et al.* Improvement stability of phycocyanin from *Spirulina platensis* encapsulated by water soluble chitosan nanoparticles. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, p. 012005, 2020.

JUNG, S. *et al.* A simple method for extracting phycocyanin from *Arthrospira (Spirulina) platensis* by autolysis. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 45, n. 10, p. 1731-1738, 2022.

KRASEASINTRA, O. *et al.* Application of phycocyanin from *Arthrospira (Spirulina) platensis* as a hair dye. **Frontiers in Marine Science**, v. 9, p. 1024988, 2022.

KOLLER, M. *et al.* Microalgae as versatile cellular factories for valued products. **Algal research**, v. 6, p. 52-63, 2014

- KUDUS, M. *et al.* Recent Developments in Production and Biotechnological Applications of C-Phycocyanin. **BioMed research international**, v. 2013, n. 1, p. 742859, 2013.
- LI, J. *et al.* Biological potential of microalgae in China for biorefinery-based production of biofuels and high value compounds. **New biotechnology**, v. 32, n. 6, p. 588-596, 2015.
- LI, Y. *et al.* Tuning C-Phycocyanin Photoactivity via pH-Mediated Assembly–Disassembly. **Biomacromolecules**, v. 22, n. 12, p. 5128-5138, 2021.
- LI, Y. *et al.* Improved pH stability, heat stability, and functionality of phycocyanin after PEGylation. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 222, p. 1758-1767, 2022.
- MACCOLL, R. Cyanobacterial Phycobilisomes. **Journal of structural biology**, v. 124, n. 2-3, p. 311-334, 1998.
- MAHENDRAN, S. *et al.* Isolation and purification of phycocyanin pigments from *Spirulina* sp. biomass and evaluation of its anticancer and antioxidant potential. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 15, n. 20, p. 26959-26969, 2025.
- MENEGOTTO, A. *et al.* Thermic and techno-functional properties of *Arthrospira platensis* protein fractions obtained by membrane separation process. **Journal of Applied Phycology**, v. 32, n. 6, p. 3885-3900, 2020.
- OSÓRIO, C. *et al.* Pigments Content (Chlorophylls, Fucoxanthin and Phycobiliproteins) of Different Commercial Dried Algae. **Separations**, v. 7, n. 2, p. 33, 2020.
- RAO, A. *et al.* Effect of salinity on growth of green alga *Botryococcus braunii* and its constituents. **Bioresource technology**, v. 98, n. 3, p. 560-564, 2007.
- RIMBAU, V. *et al.* C-Phycocyanin protects cerebellar granule cells from low potassium/serum deprivation-induced apoptosis. **Naunyn-Schmiedeberg's archives of pharmacology**, v. 364, n. 2, p. 96-104, 2001.
- RODA-SERRAT, M. *et al.* Fast cleavage of phycocyanobilin from phycocyanin for use in food colouring. **Food Chemistry**, v. 240, p. 655-661, 2018.
- SARADA, R. *et al.* Phycocyanin from *Spirulina* sp.: influence of processing of biomass on phycocyanin yield, analysis of efficacy of extraction methods and stability studies on phycocyanin. **Process biochemistry**, v. 34, n. 8, p. 795-801, 1999.
- SINGH, J. *et al.* Commercialization potential of microalgae for biofuels production. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 14, n. 9, p. 2596-2610, 2010.
- SOROR, A. *et al.* Evaluation of Green Silver Nanoparticles Fabricated by *Spirulina platensis* Phycocyanin as Anticancer and Antimicrobial Agents. **Life**, v. 12, n. 10, p. 1493, 2022.
- SPOLAORE, P. *et al.* Commercial applications of microalgae. **Journal of bioscience and bioengineering**, v. 101, n. 2, p. 87-96, 2006.
- STANIC-VUCINIC, D. *et al.* *Spirulina* Phycobiliproteins as Food Components and Complements. **Microalgal Biotechnol**, 2018.
- ZHANG, Z. *et al.* Improvement of the colloidal stability of phycocyanin in acidified conditions using whey protein-phycocyanin interactions. **Food Hydrocolloids**, v. 105, p. 105747, 2020.
- ZHENG, Y. *et al.* Phycocyanin fluorescent probe from *Arthrospira platensis*: preparation and application in LED-CCD fluorescence density strip qualitative detection system. **Journal of Applied Phycology**, v. 31, n. 2, p. 1107-1115, 2019.

Biofertilizante a partir de biomassa de microalga (*Arthrospira* sp.) cultivada em efluente industrial cervejeiro

Arthur Costa dos Santos²⁸, Isadora de Oliveira Santo²⁸, Thalia de Souza Silva²⁸, Bernardo Ferreira Braz²⁹, Fernando Henrique Cincotto²⁹, Ricardo Erthal Santelli²⁹, Bruna de Lemos Novo³⁰, Arthur Lima e Silva³¹, Denise Maria Guimarães Freire³¹ e Anita Ferreira do Valle^{28, 32}

Resumo

A produção de fertilizantes nitrogenados sintéticos está associada a um grande gasto energético e emissão de CO₂, devido às elevadas temperaturas envolvidas no processo produtivo. Sua aplicação na agricultura leva à emissão de óxido nitroso (N₂O), um dos principais gases de efeito estufa, via decomposição microbiana pelo processo de desnitrificação. A cianobactéria *Arthrospira* sp. apresenta elevado teor proteico, podendo atingir 80%, surgindo como fonte alternativa de nitrogênio. As microalgas são agentes de biorremediação promissores, pois geram uma biomassa de maior valor agregado, aumentando a sustentabilidade do processo. Este estudo, em parceria com a Ambev, avaliou a produção de biomassa de microalgas em efluente cervejeiro bruto, comprovando a robustez da cepa e tratando efluente no processo, com produtividade média de 10,68 ± 5,13 g/m².dia. Foi avaliado também o efeito de um biofertilizante à base da biomassa de microalga em culturas de cevada (*Hordeum vulgare*), em comparação ao plantio com fertilizante sintético e sem fertilização, visando conectar as extremidades dos processos em um ciclo sustentável. Análises de crescimento e análises elementares foram realizadas nas plantas para avaliar a diferença potencial de macro e micronutrientes entre os tratamentos, além da presença de possíveis contaminantes oriundos do cultivo em efluente.

Palavras-chave: Microalgas. *Arthrospira* sp.. Biorremediação. Biofertilizante.

Abstract

The production of synthetic nitrogen fertilizers is associated with high energy consumption and CO₂ emissions due to the high temperatures involved in the production process. Its application in agriculture leads to the emission of nitrous oxide (N₂O), a major greenhouse gas, via microbial decomposition through the denitrification process. The cyanobacterium *Arthrospira* sp. has a high protein content, potentially reaching 80%, emerging as an alternative source of nitrogen. Microalgae are promising bioremediation agents as they generate biomass with higher added value, increasing the sustainability of the process. This study, in partnership with Ambev, evaluated the production of microalgae biomass in raw brewery effluent, proving the robustness of the strain and treating the effluent in the process, with an average productivity of 10.68 ± 5.13 g/m².day. The effect of a biofertilizer based on microalgae biomass was also evaluated in barley (*Hordeum vulgare*) crops, in comparison to planting with synthetic fertilizer and without fertilization, aiming to connect the ends of the processes in a sustainable cycle. Growth and elemental analyses were performed on the plants to evaluate the potential difference between macro and micronutrients among the treatments, besides the presence of contaminants from cultivation in the effluent.

Keywords: Microalgae. *Arthrospira* sp.. Bioremediation. Biofertilizer.

28 Laboratório de Bioquímica e Biotecnologia de Algas, Instituto de Química, UFRJ. arthurcostasantos.rj@gmail.com
29 Laboratório de Desenvolvimento Analítico, Instituto de Química, UFRJ.
30 Departamento de Química Inorgânica, Escola de Química, UFRJ.
31 Laboratório de Biotecnologia Microbiana, Instituto de Química, UFRJ
32 Contatos: arthurcostasantos.rj@gmail.com | 99799903@ambev.com.br | avalue@iq.ufrj.br

Introdução

O surgimento do processo Haber-Bosch (1908-1913) propulsiona sobretudo a produção de ureia, se tornando o fertilizante nitrogenado mais utilizado no mundo. No entanto, o processo produtivo é responsável por cerca de 1,5% do consumo global anual de energia fóssil e emite cerca de 12,5 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) por ano, visto que o processo se utiliza de temperaturas elevadas (Costa A. *et al.*, 2009).

Sua aplicação na agricultura leva a um acúmulo de nitrogênio no solo que culmina em sua decomposição microbiana através do processo de desnitrificação, resultando na emissão de óxido nitroso (N₂O), um dos principais gases de efeito estufa, com potencial de efeito estufa cerca de 300 vezes maior que o CO₂ (De Klein *et al.*, 2006).

A cianobactéria *Arthrospira* sp. apresenta um elevado teor proteico, podendo atingir até 80% de sua biomassa seca como proteína (Silva S. *et al.* 2021), surgindo como uma fonte alternativa de nitrogênio. A etapa de produção de microalgas apresenta um gargalo tecnológico atrelado ao elevado custo com meio de cultivo e de sua manutenção. Entretanto, microalgas são frequentemente apontadas como promissores agentes para a biorremediação de efluentes (Mohsenpour, *et al.*, 2021; Blanco-Vieites, *et al.*, 2023; Mohamadnia, *et al.*, 2023). Esses microrganismos se destacam por apresentarem grandes taxas de remoção de contaminantes, tratando o efluente, produzindo uma biomassa de maior valor agregado a partir de um cultivo de custo reduzido (Pacheco *et al.*, 2020).

Estima-se que para cada volume de cerveja produzido, seja gerado um volume até dez vezes maior de efluente (Olajire, 2020). Esse efluente é não tóxico e não apresenta quantidades significativas de metais pesados, ainda assim, necessita de tratamento antes do descarte para o cumprimento da legislação (Raposo, *et al.*, 2010). Sendo rico em matéria orgânica, apresenta característica eutrofizante, que estimula o crescimento de microalgas.

Macro e microalgas têm sido constantemente relatadas na literatura como bioestimulantes e biofertilizantes promissores para uma série de culturas de interesse comercial (Chatterjee, *et al.*, 2017; Win, *et al.*, 2018). Dessa forma, evocando os conceitos da economia circular, a aplicação de produção de um biofertilizante a partir da biomassa produzida no efluente gerado pela indústria cervejeira.

Desenvolvimento e resultados

Metodologia

O efluente industrial a ser utilizado como meio de cultivo foi coletado na Estação de Tratamento de Efluentes Industriais (ETEI) da cervejaria Nova Rio da Ambev S.A.. A coleta foi realizada na entrada do efluente bruto na ETEI, antes de qualquer etapa de tratamento.

Em laboratório, a partir de culturas de *Arthrospira* sp. cultivadas em condições ideais, com temperatura, luz e oxigenação controladas, e meio de cultivo AO (Aiba; Ogawa, 1977) foram realizados testes cinéticos para avaliar a concentração otimizada de inóculo. Assim, foi possível iniciar etapas sequenciais de escalonamento do cultivo, de 250 mL até 150 L, aclimatando a cepa de microalga ao efluente industrial bruto. Durante essa etapa, o crescimento celular foi acompanhado por densidade óptica em espectrofotômetro nos comprimentos de 682 nm (ponto de máximo de absorção de clorofila-a). O escalonamento em escala laboratorial culminou em um cultivo de 150 L de *Arthrospira* sp. aclimatada ao efluente bruto com densidade óptica acima de 1,000. Esse volume foi utilizado então como inóculo em 150 L de efluente bruto fresco para dar início ao tanque de 300 L no qual se deu a produção de biomassa *outdoor* por 100 dias de experimento.

O tanque do tipo *raceway* atuou com 300 L de volume útil para o cultivo em escala piloto. Durante o experimento houve o acompanhamento dos parâmetros físico-químicos associados ao cultivo: salinidade, pH, irradiância luminosa e temperatura do cultivo. O crescimento das microalgas foi avaliado através de medidas espectrofotométricas para os comprimentos de 682 nm e 750 nm (onde não há absorção de pigmentos, portanto, a absorção se dá pelo particulado) e por peso seco. Paralelamente às análises diárias, em intervalos que variaram de 7 a 20 dias, 35% do volume do tanque era retirado e filtrado por gravidade. O volume retirado era repostado com uma carga de efluente bruto fresco, obtido na ETEI da cervejaria, como uma forma de alimentação para o cultivo. A biomassa úmida retida

pelo filtro era seca ao abrigo de sol sob uma cúpula de policarbonato, garantindo assim a secagem completa da biomassa cultivada no tanque.

Alíquotas do efluente que permeava o filtro foram coletadas e analisadas em cromatógrafo iônico para avaliar a concentração dos íons sódio (Na⁺), amônio (NH₄⁺), potássio (K⁺), cálcio (Ca⁺) e magnésio (Mg⁺), fluoreto (F⁻), cloreto (Cl⁻), brometo (Br⁻), nitrito (NO₂⁻), nitrato (NO₃⁻), fosfato (PO₄³⁻) e sulfato (SO₄²⁻).

A biomassa cultivada foi então utilizada na formulação de um biofertilizante. Bagaço de malte foi utilizado como ingrediente na formulação final visando agregar valor a um resíduo da produção cervejeira. O biofertilizante foi então produzido em uma extrusora, formando pequenos *pellets*.

A validação da eficácia do biofertilizante foi realizada buscando reproduzir as condições usuais de plantio da cultura, o solo utilizado no experimento foi coletado dos campos de cultivo de cevada da Ambev em Passo Fundo, Rio Grande do Sul. As plantas foram mantidas em temperatura de 20°C ± 2°C e fotoperíodo de 12h:12h. Três diferentes tratamentos foram utilizados para avaliar comparativamente o desenvolvimento da planta: controle neutro, sem fertilização; tratamento com fertilizante comercial NPK 10-10-10; e tratamento com biofertilizante com biomassa de *Arthrospira* sp. cultivada em efluente industrial cervejeiro. As quantidades de fertilizante sintético e biofertilizante utilizadas nos tratamentos foram determinadas tomando como base a recomendação de nitrogênio por hectare da Embrapa para o cultivo de cevada.

A etapa de plantio da cevada e avaliação de crescimento também teve duração total de 100 dias, ao longo do experimento foram realizadas medições de comprimento da parte aérea da planta, o cálculo de taxa de emergência. Além disso, foram colhidas plantas com 30, 60 e 100 dias de plantio para análises de peso fresco, peso seco, assim como o cálculo da umidade. Também foram submetidas para análises de CHN e espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP) que seguem em andamento.

Resultados e discussões

46

O crescimento de *Arthrospira* sp. em efluente industrial em escala piloto comprovou a robustez da cepa e a viabilidade de um cultivo em condições não ideais. A produtividade média do cultivo foi de 10.68 ± 5.13 g/m².dia. A instabilidade observada na produtividade se dá pela variabilidade de fatores abióticos esperados para cultivos abertos e pelos ciclos de esgotamento e alimentação que, para evitar a morte celular, devem ser realizados idealmente a cada 7 dias, mas que no presente trabalho apresentaram intervalos maiores.

Tabela 1. Taxas de remoção, porcentagem de remoção máxima e faixas de saída de componentes de águas residuais não tratadas de cervejaria.

Componente	Taxa de remoção (mg/L.dia)	Remoção máxima (%)	Faixa de saída (mg/L)	Limite da legislação* (mg/L)
Nitrato (NO ₃ ⁻)	0,23 ± 0,06	56,8	1,0 – 4,5	0,7 – 18,0
Nitrito (NO ₂ ⁻)	0,07 ± 0,04	100,0	0,0 – 0,9	0,1 – 1,7
Amônio (NH ₄ ⁺)	0,22 ± 0,16	100,0	0,0 – 4,5	1,2 – 16,0
Fosfato (PO ₄ ³⁻)	2,29 ± 1,08	33,6	20,0 – 35,0	0,03 – 0,30
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	6,74 ± 4,76	78,7	1,0 – 50,0	250,0
Fluoreto (F ⁻)	4,30 ± 2,33	98,2	1,0 – 50,0	1,4
Carbono Org.	20,90 ± 6,25	75,2	10,0 – 30,0	3,0 – 10,0

*As faixas de valores reportados como limite da legislação para efluentes dependem das características da bacia receptora, de acordo com a regulamentação brasileira (Brasil, 2005).

Com exceção do fosfato (PO_4^{3-}), os demais íons se encontram dentro do limite da legislação para o descarte desse tipo de efluente. Ainda assim, o enquadramento da maioria dos componentes mostra o potencial da microalga enquanto agente de biorremediação, podendo complementar estratégias já utilizadas para o tratamento de efluentes, como a precipitação química para a remoção do excedente de fosfato observado.

Figura 1. Gráfico da taxa de emergência para as sementes de cevada por tempo em dias.

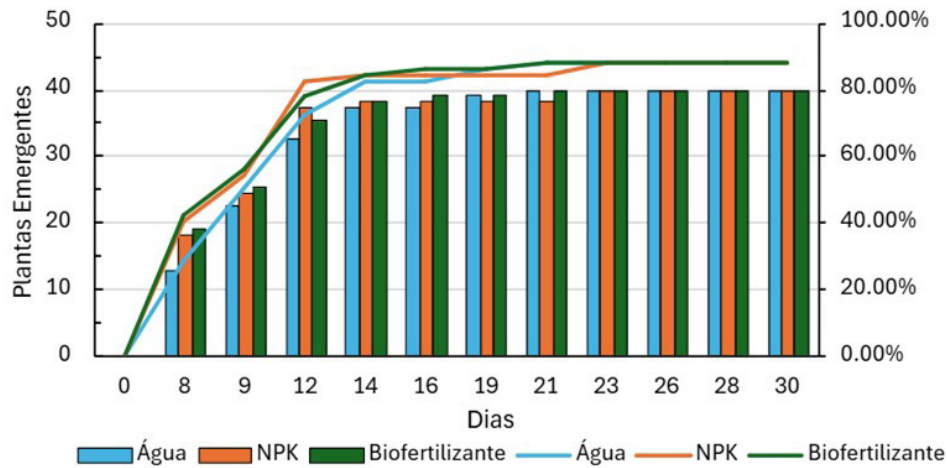
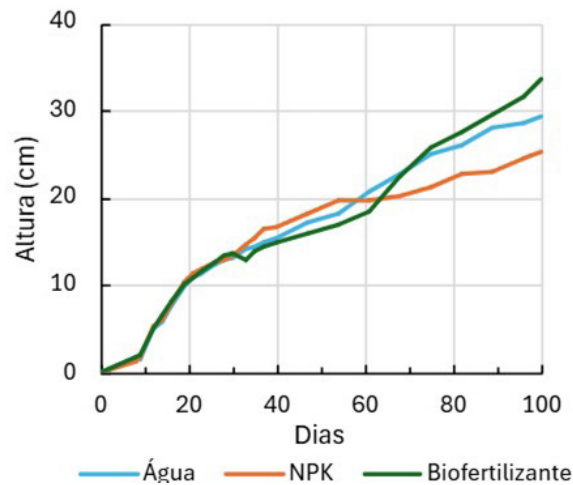


Figura 2. Gráfico do crescimento das plantas de cevada por tratamento em dias.



Para as análises do plantio de cevada, não foram observadas diferenças significativas entre as taxas de emergência das sementes entre os tratamentos, sendo todas iguais a 80%. As plantas cultivadas com biofertilizante apresentaram alturas maiores quando comparadas aos demais tratamentos a partir do 75º dia de experimento. Através das análises elementares restantes de CHN e ICP, será avaliada a potencial diferença entre os macro e micronutrientes entre os tratamentos, avaliando também a presença de possíveis contaminantes oriundos do cultivo da biomassa em efluente industrial.

Conclusão

A resistência e o crescimento apresentados pela cepa durante a etapa de cultivo era esperada e reflete uma grande capacidade de adaptação a meios de cultivo não ideais. O consumo de nutrientes no meio contribui imperativamente para o crescimento celular e a remoção da maior parte dos componentes, com exceção do fosfato. O cultivo em águas residuais de custo zero agrega valor à biomassa e evoca os conceitos da economia circular.

Nesse sentido, o que se busca é conectar as extremidades desse ciclo de sustentabilidade através de uma solução mais verde, sustentável e com a possibilidade de investimento no mercado de créditos de carbono. Os resultados preliminares para o biofertilizante são promissores e se espera confirmar sua equivalência ao fertilizante sintético.

Referências

AIBA, S.; OGAWA, T. Assessment of growth yield of a blue-green alga, *Spirulina platensis*, in axenic and continuous culture. **Microbiology**, v. 102, n. 1, p. 179-182, 1977.

BLANCO-VIEITES, M. *et al.* Enhancement of *Arthrospira* sp. culturing for sulfate removal and mining wastewater bioremediation. **International journal of phytoremediation**, v. 25, n. 9, p. 1116-1126, 2023.

Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução n. 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes. Secretaria de Defesa Agropecuária**. – Brasília: Mapa/ACS, 2009

CHATTERJEE, A. *et al.* Role of algae as a biofertilizer, algal Green Chemistry. **Recent Progress Biotechnol.**, p. 189-200, 2017.

COSTA, A. R. *et al.* **Uso do nitrogênio na agricultura e suas implicações na emissão do gás de efeito estufa óxido nitroso (N₂O)**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2009.

DE KLEIN, C. *et al.* **N₂O emissions from managed soils, and CO₂ emissions from lime and urea application**. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006

KUMAR, R. *et al.* Algae-based bioremediation bioproducts and biofuels for biobusiness. **Bioremediation and bioeconomy**. Elsevier, p. 583-635, 2024.

MOHAMADNIA, S. *et al.* Valorization of potato starch wastewater using anaerobic acidification coupled with *Chlorella sorokiniana* cultivation. **Journal of Applied Phycology**, v. 35, n. 6, p. 2645-2658, 2023.

MOHSENPOUR, S. F. *et al.* Integrating micro-algae into wastewater treatment: a review. **Science of the Total Environment**, v. 752, p. 142168, 2021.

MOREIRA, J. B. *et al.* Role of microalgae in circular bioeconomy: from wastewater treatment to biofuel production. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 25, n. 2, p. 427-437, 2023.

OLAJIRE, A. A. The brewing industry and environmental challenges. **Journal of cleaner production**, v. 256, p. 102817, 2020.

PACHECO, D. *et al.* Microalgae water bioremediation: trends and hot topics. **Applied Sciences**, v. 10, n. 5, p. 1886, 2020.

PAPADOPOULOS, K. P. *et al.* Cultivation of *Arthrospira platensis* in brewery wastewater. **Water**, v. 14, n. 10, p. 1547, 2022.

RAPOSO, M. F. J. *et al.* On the utilization of microalgae for brewery effluent treatment and possible applications of the produced biomass. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 116, n. 3, p. 285-292, 2010.

SILVA, A. *et al.* Bioremediation of brewery wastewater using *Arthrospira* sp.: Preliminary assessment of biomass as a biofertilizer toward circular economy. **Journal of Applied Phycology**, v. 37, n. 1, p. 55-65, 2025.

SILVA, S. P.; VALLE, A. F.; PERRONE, D. Microencapsulated *Spirulina maxima* biomass as an ingredient for the production of nutritionally enriched and sensorially well-accepted vegan biscuits. **Lwt**, v. 142, p. 110997, 2021.

WIN, T. T. *et al.* Algal biofertilizers and plant growth stimulants for sustainable agriculture. **Industrial Biotechnology**, v. 14, n. 4, p. 203-211, 2018.

Desenvolvimento e produção de bioplástico a partir de macro e microalgas num sistema de cultivo sustentável

Rafael Carvalho da Silveira³³, Douglas Balbino de Moura³³, Michelle Amario³³, Jéssica Sodré Mendes³⁴, Cristina Aparecida Gomes Nassar³⁵, Eliane de Oliveira Ferreira³⁶, Emerson Oliveira da Silva³⁷, Anita Ferreira do Valle³³

Resumo

Este projeto visou o desenvolvimento e a produção de um bioplástico sustentável de macroalgas e microalgas produzido por tecnologia casting. Este produto é natural, biodegradável e escalonável. As algas que foram utilizadas como matrizes para produção do bioplástico foram cultivadas em efluente industrial de cervejaria ou águas poluídas de sistemas aquáticos naturais, como a Baía de Guanabara. O processo de produção do bioplástico iniciou-se com o tratamento de rejeitos industriais e águas poluídas, além da remoção de carbono via fotossíntese. Através da fotossíntese, as algas fixaram o CO₂ atmosférico para construção de uma biomassa rica em polímeros que foi utilizada na produção do bioplástico. O bioplástico foi analisado fisicamente, a fim de ser classificado como plástico e microbiologicamente. Os resultados mostraram que o sistema é promissor e escalonável. O aumento da biomassa da microalga no bioplástico reduziu quantitativamente e qualitativamente o crescimento microbiano, mas não mostrou diferença com relação à análise do bioplástico. Sugere-se que seja adicionado 25% da biomassa da microalga no bioplástico visando uma maior segurança microbiológica. Todo o processo torna o bioplástico limpo, biodegradável e seguro para o meio ambiente e toda sua biota.

Palavras-chave: Bioplástico. Macroalga. Microalga. Biorremediação.

50

Abstract

This project aimed to develop and produce a sustainable bioplastic from macroalgae and microalgae produced by casting technology. This product is natural, biodegradable and scalable. The algae that were used as matrices for the production of the bioplastic were cultivated in industrial effluent from breweries or polluted waters from natural aquatic systems, such as Guanabara Bay. The bioplastic production process began with the treatment of industrial waste and polluted waters, in addition to the removal of carbon via photosynthesis. Through photosynthesis, the algae fixed atmospheric CO₂ to build a polymer-rich biomass that was used in the production of the bioplastic. The bioplastic was analyzed physically in order to be classified as plastic and microbiologically. The results showed that the system is promising and scalable. The increase in microalgae biomass in the bioplastic reduced quantitatively and qualitatively the microbial growth, but showed no difference in relation to the analysis of the bioplastic. It is suggested that 25% of microalgae biomass be added to the bioplastic to ensure greater microbiological safety. The entire process makes the bioplastic clean, biodegradable and safe for the environment and all its biota.

Keywords: Bioplastic. Macroalgae. Microalgae. Bioremediation.

-
- 33 Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Química, Laboratório de Estudos Aplicados em Fotossíntese, Centro de Tecnologia, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro - RJ. rafaelcsilveira@eq.ufrj.br; dgbalbino@ufrj.br; mia.ufrj@gmail.com; avalor@iq.ufrj.br
- 34 ICONIC Lubrificantes, Setor de Pesquisa e Desenvolvimento, Rua Silésia, 3501, Duque de Caxias - RJ. jessicasodremendes@gmail.com
- 35 Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Biologia. nassar@biologia.ufrj.br
- 36 Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Microbiologia Paulo de Góes. eliane_ferreirarj@micro.ufrj.br
- 37 Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano. eos@ima.ufrj.br

Introdução

Devido à crescente problemática ambiental dos polímeros e busca por materiais renováveis e biodegradáveis, a produção de bioplásticos é uma opção, não apenas viável, mas também versátil devido à diversidade de matrizes possíveis (Dang *et al.*, 2022; Sudhakar; Magesh Peter; Dharani, 2020). As macroalgas do gênero *Kappaphycus* são largamente utilizadas como fontes de componentes gelificantes como a carragena sendo propício para a obtenção de polímeros. Além disso, as microalgas do gênero *Spirulina* apresentam uma grande diversidade de proteínas e carboidratos, sendo integrantes da alimentação de diversos organismos aquáticos. Nesse trabalho, buscamos produzir um bioplástico sustentável para embalagens de alimentos secos ou oleosos, produzido a partir da biomassa integral da macroalga *Kappaphycus alvarezii* com a adição de diferentes concentrações de *Spirulina maxima*, a fim de verificar suas propriedades mecânicas e a segurança microbiológica do mesmo.

Desenvolvimento e resultados

Metodologia

Foram utilizados 3g de *Kappaphycus alvarezii* a cada batelada. As macroalgas cultivadas em água sintética (controle) e as cultivadas na água da baía de Guanabara foram utilizadas em bateladas diferentes, sem misturá-las. Utilizamos 1,5g de sorbitol e 0,1mL de ácido acético por batelada. Foram utilizadas a concentrações de 0%, 10%, 15%, 20% e 25% de biomassa da microalga *Spirulina maxima* crescida em meio de cultura tradicional (controle) e cultivada em efluente cervejeiro, em relação à quantidade de macroalga utilizada. Em um erlenmeyer de 250mL foram acrescentados 150mL de água destilada, 3g de *Kappaphycus* e levados à faixa de temperatura de 80°C 90°C por 30 minutos em placa de aquecimento com agitação vigorosa. Após esse tempo, são acrescentados o ácido acético e o sorbitol. Uma vez adicionados, a temperatura é elevada rapidamente até 98°C e uma vez atingida esse valor, o erlenmeyer é retirado da placa de aquecimento e levado a uma placa de agitação simples em velocidade baixa a fim de promover o resfriamento lento. Enquanto isso, a quantidade de spirulina é suspensa em 10mL de água e deixada em estufa a 37°C para aclimação. Uma vez que a mistura em resfriamento atingiu 42°C-43°C, a biomassa de *S. maxima* é acrescentada à mistura do erlenmeyer sob agitação lenta e homogeneizada por alguns segundos. Após a adição, a mistura é vertida em placa de acrílico e levada à estufa a 37°C entre 24h e 48h para secagem completa do plástico. Uma vez seco, o bioplástico é removido com o auxílio de uma espátula e guardado entre duas folhas A4. O teste mecânico foi realizado em máquina de ensaio universal no Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano (IMA) e o teste microbiológico foi realizado em cultura em meio de tioglicolato e analisado via MALDI-TOF, no Instituto de Microbiologia Paulo de Góes.

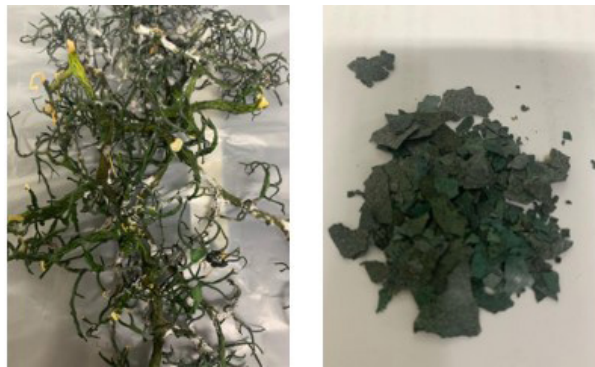
Discussões e resultados

A Figura 1 mostra os resultados obtidos desde o cultivo das algas em escala laboratorial até o cultivo em escala industrial, em tanques tipo raceways, com capacidade de 1000L. Foi possível produzir um bioplástico controle, onde as algas (macroalga e microalga) foram cultivadas em meio de cultura e um bioplástico sustentável, onde a microalga foi cultivada remediando um efluente cervejeiro e a macroalga foi cultivada remediando a água da Baía de Guanabara. A Tabela 1 mostrou que no bioplástico controle houve um efeito de aumento do módulo elástico com a adição da biomassa de *S. maxima*, principalmente nas concentrações de 10 e 15%, indicando que este plástico possui maior rigidez e necessita de maior força para ser rompido. Esse comportamento foi acompanhado pela tensão na ruptura, confirmando a necessidade de maior força. A análise do bioplástico sustentável mostrou que não houve efeito da adição da biomassa de *S. maxima* quanto às propriedades analisadas.

Figura 1. Montagem do sistema de cultivo da macroalga e da microalga em sistema laboratorial e industrial (A); aspecto das biomassas secas da macroalga e da microalga (B); aspecto do bioplástico produzido com as biomassas controle (C); e aspecto do bioplástico produzido com as biomassas da microalga crescida em efluente cervejeiro e macroalga crescida na água da Baía de Guanabara (D).

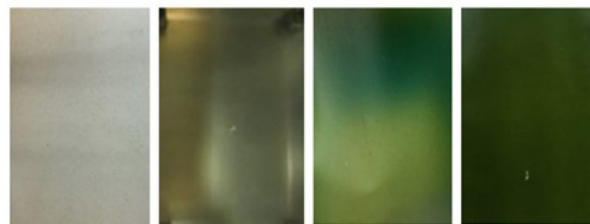


(A)



(B)

Condição controle



0% SM

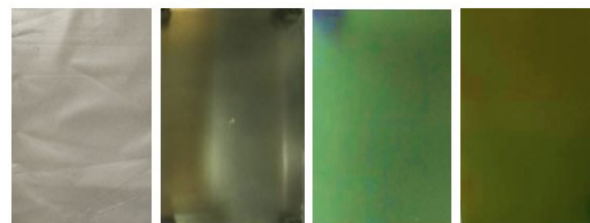
15% SM

20% SM

25% SM

(C)

Condição tratamento



0% SM

15% SM

20% SM

25% SM

(D)

Tabela 1. Testes mecânicos realizados com o bioplástico controle (água sintética) e o bioplástico sustentável (água da Baía) adicionados de 0%, 10%, 15%, 20% e 25% de biomassa de *Spirulina maxima*.

Código	spirulina (%)	Arquivo com dados	Módulo elástico (Mpa)	Desvio padrão	Alongamento na ruptura (mm)	Desvio padrão	Tensão máxima (MPa)	Desvio padrão	Número de espécimes
Água sintética									
AS00	0	an003-24	288,65681	58,46352	14,606	3,20231	7,352	0,31576	4
AS10	10	an007-24	491,41979	33,55811	9,836	1,58290	10,393	0,64483	5
AS15	15	an005-24	464,78498	59,53222	11,513	2,01434	10,218	1,29719	5
AS20	20	an006-24	309,91021	29,38591	13,840	2,85067	6,852	0,43117	5
AS25	25	an004-24	326,09091	29,43042	12,142	1,09210	7,213	0,62140	5
Água da baía									
AB00	0	an008-24	254,09386	15,65816	18,766	3,48058	8,219	0,87121	5
AB10	10	an009-24	246,02609	52,26746	16,287	1,85437	7,341	1,01473	5
AB15	15	an010-24	249,66589	44,71974	16,966	2,34193	7,41	1,13375	5
AB20	20	an011-24	262,18813	9,85886	15,525	0,88735	8,269	0,41285	5
AB25	25	an012-24	265,47749	23,39377	16,263	0,98097	7,678	0,75249	5

Com relação à análise microbiológica, todas as amostras apresentaram crescimento microbiológico em alguma extensão. No entanto, apesar de apresentar contaminação microbiológica em todos os tubos, é possível perceber que as amostras com maior concentração de adição de biomassa da microalga *Spirulina maxima* apresentaram menor quantidade de microrganismos mensuráveis no plástico, com uma menor quantidade de colônias. Além disso, a diversidade microbiana presente também diminui à medida que a concentração de microalga aumenta no bioplástico. O microrganismo mais resistente encontrado nas amostras dos bioplásticos foi o *Bacillus cereus thuringiensis*, uma bactéria usada como controle agrícola em campo e com efeitos. Em contrapartida, os bioplásticos com menor quantidade de adição de biomassa da microalga apresentaram organismos patogênicos como *Staphylococcus saprophyticus*, causador de infecções urinárias. Apesar de o UFC/mL se mostrar elevado, excedendo limites da legislação para alimentos, na maioria dos casos dos bioplásticos não foi possível mensurar o que significa uma quantidade muito baixa para ser detectada pelo MALDI. De um modo geral, o aumento da concentração de biomassa da microalga reduz qualitativamente e quantitativamente o conteúdo microbiológico que pode crescer no bioplástico.

Tabela 2. Análise dos bioplásticos produzidos. As amostras nomeadas com a letra B se referem ao bioplástico sustentável e as amostras nomeadas com a letra S se referem ao bioplástico controle. A % se refere à porcentagem de biomassa de *S. maxima* adicionada nos bioplásticos.

MALDI	Poços	Nome	%	Resultado	Contagem	UFC/mL
1º	E5 E6	S1	0%	<i>Bacillus cereus thuringiensis</i>	120	1,2x10 ⁵
1º	G9 G10	S2	0%	Não identificado	Não mensurável	Não aplicável
1º	E3 E4	S3	0%	<i>Priestia megaterium</i>	99	9,9x10 ⁴
1º	G7 G8	B1	0%	Não identificado	Não mensurável	Não aplicável
1º	F3 F4	B2	0%	<i>Pantoea eucrina</i>	Não mensurável	Não aplicável
1º	F5 F6	B2	0%	<i>Bacillus pumilus</i>	Não mensurável	Não aplicável
1º	E1 E2	B3	0%	<i>Streptococcus salivarius</i>	Não mensurável	Não aplicável
1º	D11 D12	B3	0%	<i>Bacillus cereus thuringiensis</i>	8	8x10 ³
1º	D3 D4	S1	10%	<i>Bacillus cereus thuringiensis</i>	952	9,52x10 ⁵
2º	A7 A8	S2	10%	<i>Staphylococcus saprophyticus</i>	2	2x10 ³
1º	F11 F12	S3	10%	<i>Bacillus subtilis</i>	Não mensurável	Não aplicável
1º	G5 G6	B1	10%	Não identificado	Não mensurável	Não aplicável
Não realizado	Não aplicável	B2	10%	Sem crescimento	Sem crescimento	N/A
1º	C1 C2	B3	10%	<i>Bacillus cereus thuringiensis</i>	176	1,76x10 ⁵
1º	C3 C4	B3	10%	Não identificado	Não mensurável	Não aplicável
1º	G1 G2	S1	15%	<i>Bacillus velezensis</i>	Não mensurável	Não aplicável
1º	C11 C12	S2	15%	<i>Bacillus cereus thuringiensis</i>	20	2x10 ⁴
1º	D1 D2	S2	15%	Não identificado	Não mensurável	Não aplicável
1º	D5 D6	S3	15%	<i>Bacillus cereus thuringiensis</i>	208	2,08x10 ⁵
2º	A5 A6	B1	15%	Não identificado	1	1x10 ³
1º	F7 F8	B2	15%	Não identificado	Não mensurável	Não aplicável
1º	F9 F10	B2	15%	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	Não mensurável	Não aplicável
1º	G3 G4	B3	15%	Não identificado	Não mensurável	Não aplicável
1º	C7 C8	S1	20%	<i>Bacillus cereus thuringiensis</i>	6	6x10 ³
1º	C9 C10	S1	20%	<i>Streptococcus salivarius</i>	224	2,24x10 ⁵
1º	G11 G12	S2	20%	<i>Bacillus cereus thuringiensis</i>	Não mensurável	Não aplicável
1º	D7 D8	S3	20%	<i>Bacillus cereus thuringiensis</i>	Não mensurável	Não aplicável
1º	D9 D10	S3	20%	Não identificado	39	3,9x10 ⁴
1º	E7 E8	B1	20%	<i>Bacillus velezensis</i>	Não mensurável	Não aplicável
1º	E9 E10	B1	20%	<i>Bacillus cereus thuringiensis</i>	Não mensurável	Não aplicável
2º	B1 B2	B2	20%	<i>Bacillus cereus thuringiensis</i>	Não mensurável	Não aplicável
2º	A11 A12	B3	20%	<i>Lactocaseibacillus paracasei</i>	Não mensurável	Não aplicável
1º	C5 C6	S1	25%	<i>Bacillus cereus thuringiensis</i>	Não mensurável	Não aplicável
1º	F1 F2	S2	25%	<i>Bacillus cereus thuringiensis</i>	Não mensurável	Não aplicável
1º	E11 E 12	S3	25%	<i>Bacillus cereus thuringiensis</i>	Não mensurável	Não aplicável
2º	B5 B6	B1	25%	<i>Staphylococcus epidermidis</i>	165	1,65x10 ⁵
2º	A1 A2	B2	25%	Não identificado	2	2x10 ³
2º	A3 A4	B3	25%	Não identificado	Não mensurável	N/A

Conclusão

O projeto se mostrou executável e escalonável até a etapa industrial. O cultivo da macroalga na água da Baía de Guanabara se mostrou viável e promissor em remover em até 100% os nutrientes causadores de eutrofização do sistema natural. Além disso, uma melhora no aspecto da água pode ser percebida a partir do terceiro dia do cultivo, tanto em escala laboratorial quanto em escala industrial. A microalga foi promissora na remoção dos mesmos nutrientes, enquadrando o efluente bruto para desague diretamente em corpos hídricos, sem que houvesse a necessidade de tratamento via ETE tradicional.

A macroalga crescida na água da baía de Guanabara permitiu a obtenção de um bioplástico íntegro e com boa estrutura. Apesar de apresentar um módulo elástico menor do que o bioplástico produzido com alga crescida na condição controle, o aumento da concentração da biomassa da microalga se mostrou eficiente para reduzir quantitativamente e qualitativamente o crescimento microbiológico nos bioplásticos durante o período de incubação em meio de cultura. Os bioplásticos se mostraram robustos e a tecnologia pode ser escalonável para escalas piloto e industriais.

Referências

DANG, B. *et al.* Current application of algae derivatives for bioplastic production: A review. **Bioresource Technology**, v. 347, p. 126698, mar. 2022.

MENDES, J. S. **Desenvolvimento e aplicação de embalagens ativas à base de ágar adicionadas de *Arthrospira maxima* (*Spirulina maxima*)**. 2024. 111 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

SUDHAKAR, M. P.; MAGESH PETER, D.; DHARANI, G. Studies on the development and characterization of bioplastic film from the red seaweed (*Kappaphycus alvarezii*). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 26, p. 33899-33913, 2021.

ARTIGOS- RESUMO

*Pesquisas em
tecnologias de
materiais aplicadas
à indústria*



Desenvolvimento de nanocompósitos poliméricos a base de polietileno de alta densidade (PEAD) e poliamida 11 (PA11) pós-consumo proveniente de plataforma offshore e nanopartículas de dióxido de silício (SiO₂)³⁸

Joyce Braga Camargo³⁹, Ana Lúcia Nazareth da Silva⁴⁰, Gisele Cristina Valle Lulianelli³⁸.

Resumo

O processo de descomissionamento offshore apresenta desafios e oportunidades à economia circular. Dentro deste contexto, o presente estudo teve por objetivo a obtenção e avaliação de sistemas poliméricos imiscíveis à base de polietileno de alta densidade (PEAD) e um polímero pós-consumo, poliamida 11 (PA11), proveniente da barreira de pressão de dutos flexíveis pós-consumo, para a obtenção de sistemas na proporção (80/20% m/m) a partir de processo de fusão por extrusão. A fim de estudar a miscibilidade do sistema, foi avaliada a ação do agente compatibilizante tradicional, o PEAD graftizado com anidrido maleico (PEAD-g-AM) (1,5 m/m) e, posteriormente, a incorporação das nanopartículas de dióxido de silício (nSiO₂), nos teores de 2% e 4% (m/m). Análises mecânicas, térmicas, reológicas e de ângulo de contato foram realizadas, e a composição com a adição de 1,5 m/m, de PEAD-g-AM apresentou menor compatibilização entre as fases PEAD e PA11. Ao se adicionar o menor teor de nanopartículas de SiO₂ (2% m/m) ao sistema PEAD/PEAD-g-AM/PA11 foi obtido um nanocompósito com um melhor balanço de propriedades térmicas e mecânicas, em virtude da redução dos domínios de PA11, indicando que as nanopartículas de SiO₂ devem atuar como co-compatibilizante na interação entre as fases PEAD e PA11.

Palavras-chaves: Misturas poliméricas imiscíveis. Processos de compatibilização. Nanocompositos. Nanopartículas de SiO₂.

Abstract

The offshore decommissioning process presents both challenges and opportunities to the circular economy. Within this context, the present study aimed to obtain and evaluate immiscible polymer systems based on high-density polyethylene (PEAD) and a post-consumer polymer, polyamide 11 (PA11), from the pressure barrier of post-consumer flexible ducts, to obtain systems in the proportion (80/20 % w/w). In order to study the miscibility of the system, the action of the traditional compatibilizing agent, HDPE grafted with maleic anhydride (HDPE-g-AM) (1.5% w/w) was evaluated, and subsequently, the incorporation of silicon dioxide nanoparticles (nSiO₂), at levels of 2% and 4% (w/w). Mechanical, thermal, rheological and contact angle analyses were performed, and the composition with the addition of 1.5% w/w, of HDPE-g-AM showed lower compatibilization between the HDPE and PA11 phases. By adding the lowest content of SiO₂ nanoparticles (2% w/w) to the HDPE/HDPE-g-AM/PA11 system, a nanocomposite with a better balance of thermal and mechanical properties was obtained, due to the reduction of the PA11 domains, the probability that the SiO₂ nanoparticles should act as a co-compatibilizer in the interaction between the HDPE and PA11 phases.

Keywords: Immiscible polymeric blend. Compatibility processes. Nanocomposites. SiO₂ Nanoparticles.

38 Agradecimentos: As autoras agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) (307889/2022) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

39 Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano (IMA), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro - RJ. joycecamargo@ima.ufrj.br

40 Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano (IMA), Programa de Engenharia Ambiental (PEA), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro - RJ.

Introdução

No ramo *offshore*, os dutos flexíveis têm se tornado um componente fundamental no cenário de exploração de petróleo, visto que apresentam condições operacionais adequadas à adaptação em grandes profundidades, variações de temperatura e correntes marinhas (CUSTÓDIO; VAZ, 2002; FERGESTAD; LØTVEIT, 2014; RODRIGUES, 2021). Tais estruturas são constituídas principalmente por camadas poliméricas tubulares e metálicas com arranjo helicoidal. Cada camada atua com uma determinada função e característica. De uma maneira geral, as camadas poliméricas possuem função de vedação, enquanto as camadas metálicas atuam na resistência mecânica da estrutura (KAGOURA *et al.*, 2003; ZHANG *et al.*, 2003; MORAIS, 2013; FERREIRA, *et al.*, 2023).

Após o tempo de operação dessas estruturas, falhas dos dutos, ou mesmo em processos de descomissionamento (SUDAIA, *et al.*, 2018, ROUSE, *et al.*, 2018), as estruturas constituídas por polímeros de engenharia, tais como poliamida 11 (PA11) (PARK, *et al.*, 2019, MOTA, *et al.*, 2024), poliamida 12 (PA12) e poli(fluoreto de vinilideno) (PVDF), são destinadas ao final de seu ciclo de vida. Assim, pesquisas envolvendo a reutilização desses materiais pós-consumo, está alinhada à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, de 2010) e permite uma melhor destinação desses materiais poliméricos pós-consumo, aumentando o seu ciclo de vida. Esta Lei é definida como um instrumento de desenvolvimento econômico e social, caracterizado por: "um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada" (BRASIL, 2010; CAMARGO, 2023).

O presente trabalho faz parte de um estudo maior sobre o desenvolvimento de nanocompósitos a partir de sistemas imiscíveis à base de polietileno de alta densidade (PEAD) comercial e poliamida 11 (PA11) pós-consumo, proveniente de dutos flexíveis *offshore*. O objetivo do presente trabalho foi divulgar a produção e a avaliação das propriedades desses sistemas poliméricos, quanto a compatibilização das fases, com o uso de um compatibilizante tradicional PEAD graftizado com anidrido maleico (PEAD-g-AM) e o efeito compatibilizante ou co-compatibilizante de nanopartículas de SiO₂ entre as fases PEAD e PA11.

Desenvolvimento e resultados

Metodologia

A amostra de PA11 pós-consumo, proveniente de barreira de pressão de dutos flexíveis *offshore*, foi fornecida pela empresa PRIMAPLAST. A amostra de barreira de pressão recebeu beneficiamento, o material foi cortado mecanicamente e posteriormente moído em moinho de facas, com prévia imersão em nitrogênio líquido. As matérias-primas comerciais usadas no presente estudo foram: Polietileno de Alta Densidade (PEAD) – Fabricante: Braskem S/A, *grade GM9450F*; Nanosilica (n-SiO₂) Aerosil® R972: Dióxido de silício (SiO₂) modificada quimicamente com dimetildiclorossilano (DDS) de fórmula química Si(CH₃)₂Cl₂, hidrofóbico. Fabricante: Evonik Operations GmbH. Área específica de 110 ± 20 m²/g e tamanho médio de partícula de 16 nm; Polietileno de alta densidade graftizado com anidrido maleico (PEAD-g-AM) com 0,4% em massa de anidrido maleico, Mw 15.000 g/mol - Fabricante: *Sigma Aldrich*. Os nanocompósitos foram obtidos pelo processo de fusão, em que as nanocargas são dispersas em um sistema polimérico no estado fundido (OJJO; RAY, 2013). Técnica que se enquadra a produção de sistemas imiscíveis reforçados com nanocargas minerais. Os grânulos obtidos de PA11 foram adicionados ao PEAD. As misturas PEAD/PA11 (80/20, %, m/m) e PEAD/PEAD-g-AM/PA11, com a adição de 2 e 4 % m/m de n-SiO₂, foram produzidas em extrusora dupla rosca co-rotacional (TeckTril), rosca do tipo modular e interpenetrante, diâmetro de 20 mm e razão L/D = 36. O perfil de temperatura da rosca usado foi: Z1=90°C / Z2=160°C / Z3=170°C / Z4=180°C / Z5=190°C / Z6=190°C / Z7=190°C / Z8=190°C / Z9=200°C / Cabeçote=200°C e a velocidade de mistura de 400 rpm. O perfil de rosca estabelecido foi adequado para garantir uma boa mistura da fase dispersa (PA11) na matriz de PEAD, tais condições foram obtidas por estudos anteriores do grupo, Rodrigues (2019).

Após processamento, as amostras foram granuladas para posterior caracterização e processamento por moldagem por injeção. As misturas foram processadas por injeção, para a obtenção dos corpos de prova (CP) foram do Tipo I (ASTM D638-2014), para o ensaio de resistência à tração, nas condições de perfil de temperatura Z1= 210°C/ Z2= 220°C/ Z3= 240°C/ Z4= 250°C/ Bico= 260° e pressão de injeção e recalque, respectivamente, de 1600 e 800 bar. A temperatura do molde foi de 30°C.

Durante o estudo, as matérias-primas PEAD e PA11 e os sistemas poliméricos foram caracterizados inicialmente por análise termogravimétrica (TGA), com o objetivo de avaliar sua estabilidade térmica. A análise foi conduzida na seguinte condição: temperatura inicial (Ti): 30°C; temperatura final (Tf): 700°C; taxa de aquecimento: 10°C/min; sob atmosfera de nitrogênio (N₂). Posteriormente realizou-se a análise de índice de fluidez- MFI (*Melt Flow Index*) como técnica reológica para determinação do comportamento de fluxo dos materiais estudados, seguindo a norma ASTM D1238 (2013) na condição de 235°C/5 kg.

As misturas poliméricas foram avaliadas quanto as propriedades mecânicas ensaio de tração: norma ASTM D638-10 (2014). Equipamento: EMIC modelo DL3000. Foram analisados 5 CP por composição estudada. Foi realizada análise estatística dos resultados obtidos pelo ensaio de tração, utilizando o software STATISTICA 6. A análise de variância (ANOVA) foi aplicada para testar as diferenças significativas entre as médias. A normalidade dos resíduos e a homogeneidade das variâncias (Cochran C) foram testadas antes dos testes de significância univariada e do teste de diferença mínima significativa de Fisher (LSD), utilizando um nível de significância de $\alpha = 0,05$.

Posteriormente, as amostras foram avaliadas quanto a sua hidrofobicidade em resposta ao nível de interação entre as fases poliméricas nos diferentes sistemas contendo PEAD e PA11, a partir da técnica de ângulo de contato usando um goniômetro Ramé-Hart 500-F1 (EUA), utilizando pelo menos cinco gotas por película de material. Para a realização da técnica as amostras de CP foram fraturadas criogenicamente. O experimento foi conduzido em temperatura ambiente, com gota de água destilada de 5 μ L, depositada sobre a superfície de uma amostra, na forma de um filme.

Resultados e discussões

Os sistemas a base de PEAD/PA11 na proporção (80/20% m/m), obtidos por processo de fusão em extrusora dupla rosca co-rotacional, e suas respectivas composição estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Composição dos sistemas PEAD/PA11 (80/20% m/m)

Amostras	Composição
1	PEAD/PA11
2	PEAD/ PEAD-g-AM / PA11
3	PEAD/ PEAD -g-AM / PA11+ 2% n-SiO ₂
4	PEAD / PEAD -g-AM / PA11+ 4% n-SiO ₂
5	PEAD /PA11 + 2% n-SiO ₂
6	PEAD /PA11 + 4% n-SiO ₂

Fonte: Ensaios realizados no Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IMA/UFRJ) – Rio de Janeiro, RJ.

A Tabela 2 mostra os resultados das propriedades térmica, mecânica e reológica. Os valores de temperatura máxima de degradação térmica (TMáx) foram obtidos a partir da análise da variação de massa do material fundido em função do aumento da temperatura pela técnica de TGA. De acordo com os valores de TMáx foi observado que presença apenas do agente compatibilizante no sistema não melhorou a estabilidade térmica. No entanto, foi possível avaliar que a adição de n-SiO₂ levou a um aumento na estabilidade térmica, especialmente quando o n-SiO₂ foi adicionado em combinação com o compatibilizante tradicional. Indicando um aumento da interação entre as fases nos sistemas analisados respondendo a uma melhor resistência térmica, uma vez que essas composições apresentaram diminuição da Tmax na presença do PEAD-g-AM e das nanopartículas de SiO₂.

Tabela 2. Resultado das propriedades térmicas, reológicas e mecânicas para as composições de PEAD/PA11⁽³⁾

Composição	T _{Máx} (°C)	MFI (± 0,05) (g/10 min)	Resistência à tração (MPa) **	Tensão na ruptura (MPa)*	Módulo elástico (MPa)*
PEAD/PA11	467	0,96	21,0	9,00	667
PEAD/ PEAD-g-AM / PA11	461	0,84	20,9	9,32	649
PEAD/ PEAD-g-AM / PA11+ 2% n-SiO ₂	482	0,75	21,8	11,7	746
PEAD/ PEAD-g-AM / PA11+ 4% n-SiO ₂	479	0,82	22,3	11,2	751
PEAD/PA11 + 2% n-SiO ₂	479	1,04	21,8	12,0	713
PEAD/PA11 + 4% n-SiO ₂	466	1,08	22,1	11,5	695

Fonte: Ensaios realizados no Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IMA/UFRJ) – Rio de Janeiro, RJ.

*Os valores foram verificados por meio de ANOVA e um intervalo de confiança de 0,95 foi aplicado.

** Valor correspondente à resistência à tração máxima.

60

A avaliação reológica foi realizada a partir dos valores de MFI, o compósito PEAD/PEAD-g-AM/PA11 contendo o menor teor de n-SiO₂ (2% em peso) apresentou um menor valor de MFI, indicando que a restrição ao fluxo é mais pronunciada nesta composição. Provavelmente, esse comportamento se deve à maior eficiência da interação entre as nanopartículas de n-SiO₂ e a matriz PEAD/PA11 na presença do compatibilizante, inibindo o fluxo das cadeias poliméricas, em resposta a uma possível melhor dispersão da n-SiO₂ na matriz. Além disso, foi observada uma redução nas viscosidades (altos valores de MFI), para ambas composições de nSiO₂ na ausência do agente compatibilizante tradicional.

A partir das propriedades mecânicas avaliadas pelo ensaio de tração, observou-se que os valores de resistência à tração, tensão na ruptura e módulo de elasticidade aumentaram com a adição das nanopartículas de SiO₂ na matriz. Com base no teste LSD de Fisher, cujos dados indicam se os valores das propriedades mensuradas são "estatisticamente iguais" ou "estatisticamente diferentes":

Os resultados mostraram que a resistência à tração e a tensão na ruptura das amostras com as nanopartículas de SiO₂ são estatisticamente semelhantes entre si. Enquanto quando comparados à matriz, eles são estatisticamente diferentes, ou seja, a adição de n-SiO₂ na presença ou ausência do compatibilizante tradicional (PEAD-g-AM) aumentou essas propriedades mecânicas.

Em relação à propriedade do módulo de elasticidade, foi demonstrado, a partir da análise estatística, que tanto a composição PEAD/PA11 quanto a PEAD/PEAD-g-AM/PA11 são estatisticamente iguais às demais amostras, exceto em relação à composição PEAD/PA11 com 4% em peso de n-SiO₂. O valor do módulo de elasticidade para este material é estatisticamente semelhante ao da amostra de PEAD/PA11 e ao da amostra de PEAD/PA11 com 2% em peso de n-SiO₂. Enquanto o PEAD/PA11 com 2% em peso de n-SiO₂ é estatisticamente diferente do PEAD/PA11. Foi possível concluir que a adição de 2% em peso de nSiO₂ à mistura promoveu um melhor equilíbrio em relação às propriedades mecânicas, tais resultados corroboram as caracterizações térmica e reológica.

A Tabela 2 apresenta os resultados de ângulo de contato para todas as composições de PEAD/PA11, na presença do PEAD-g-AM, com e sem a incorporação de n-SiO₂.

Tabela 4. Valores de Ângulo de contato das misturas PEAD/PA11 e PEAD/PEAD-g-AM/PA11 com diferentes teores do agente compatibilizante.

Composição PEAD/PA11 (80/20 %, m/m)	Ângulo de contato (± 4°) (°)	Imagem
PEAD	75	
PEAD/PA11	76	
PEAD/PEAD-g-AM/PA11	87	
PEAD/PEAD-g-AM/PA11 + 2% nSiO2	83	
PEAD/PEAD-g-AM/PA11 + 4% nSiO2	79	
PEAD/PA11 + 2% nSiO2	88	
PEAD/PA11 + 4% nSiO2	94	

Fonte: Elaborada pela autora.

A partir dos resultados do ângulo de contato apresentados na Tabela 2, foi possível observar que houve um aumento do ângulo para todas as composições compatibilizadas em relação à mistura PEAD/PA11, sinalizando que a adição do agente compatibilizante tradicional, PEAD-g-AM, bem como a incorporação da nanocarga SiO₂, com ou sem a presença do compatibilizante, leva a um certo nível de aumento do caráter hidrofóbico do sistema final, com o aumento da interação entre as fases. Destaca-se a composição PEAD/PA11 com a adição de 4% nSiO₂.

De um modo geral, é possível sinalizar que a incorporação das nanopartículas de SiO₂ comercial apresenta efeito no processo de compatibilização do sistema imiscível PEAD/PA11. A avaliação das propriedades térmicas e mecânicas corroboram a avaliação reológica e de ângulo de contato. O que sugere que a morfológica desses sistemas foi alterada devido à ação co-compatibilizante, respondendo à redução dos domínios da fase dispersa, a PA11, na matriz PEAD, na presença do PEAD-g-AM (nas composições com 2% e 4% de nSiO₂). Entretanto, deve-se considerar a possibilidade que existe, em certo nível molecular, uma ação compatibilizante da nanocarga entre as fases PEAD e PA11, mesmo sem a presença do compatibilizante, como sinalizam as análises de reologia e de ângulo de contato. O sistema estudado é bastante complexo e um maior entendimento acerca dos mecanismos envolvendo os processos de compatibilização entre fases de polímeros imiscíveis ainda se faz necessário.

Conclusão

A adição do agente compatibilizante tradicional, PEAD-g-AM, em 1.5%, levou a um nível baixo de interação entre as fases PEAD e PA11. Sendo assim, foi realizada a adição das nanopartículas de SiO₂ ao sistema polimérico, para avaliação de um possível efeito compatibilizante ou co-compatibilizante da nanocarga no sistema PEAD/PEAD-g-AM/PA11. As análises mecânicas, térmicas, reológicas e de ângulo de contato mostraram que a adição de 2% da nanocarga SiO₂, na presença do agente compatibilizante, produziu sistemas com melhor balanço de propriedades, indicando o efeito co-compatibilizante das nanopartículas de SiO₂ no sistema em questão. Deve também considerar a possibilidade de um efeito compatibilizante da nanocarga nSiO₂ entre as fases PEAD e PA11, como sinaliza as análises de ângulo de contato. De acordo com as propriedades mecânicas do produto final, há a possibilidade do sistema estudado ter como aplicação a produção de peças injetadas para o ramo da construção civil.

Referências

- BRASIL. *Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010*. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>.
- CUSTÓDIO A. B.; VAZ, M. A. A nonlinear formulation for the axisymmetric response of umbilical cables and flexible pipes. **Applied Ocean Research**, v. 24, p. 21–29, 2002.
- FERREIRA, A.; ROCHA, E.; JANDORNO JR, J.; SOUSA, A.; DA SILVA, A. **Boletim Polímero**, v. Online, p. 1, 2023.
- FERGESTAD, D.; LØTVEIT, S. A. **Handbook on design and operation of flexible pipes**. 3. ed. Trondheim: Marintek, 2014.
- MARTINS, M. *et al.* Offshore energy structures in the North Sea: past, present and future. **Marine Policy**, v. 152, p. 105629, 2023.
- KAGOURA, T. *et al.* Development of a flexible pipe for pipe-in-pipe technology. **Furukawa Review**, v. 24, p.69-74, 2003.
- MOTA, G. P. *et al.* Evaluation of aging process of PA11 from offshore flexible pipe pressure barrier. **Applied Ocean Research**, v. 144, p. 103917, 2024.
- RODRIGUES, A. C. *et al.* Micromechanical Property Study of Nylon 11 and Organoclay Systems for Offshore Flexible Pipe. **Fibers and Polymers**, v. 22, n. 11, p. 3172-3182, 2021.
- ZHANG, Y. *et al.* State of the art analytical tools improve optimization of unbonded flexible pipes for deepwater environments. **In: Offshore Technology Conference, 2003, Houston. Houston: OTC, 2003. Paper OTC-15169-MS.**
- ZHANG, C. L. *et al.* **Dual effects of compatibilizer on the formation of oriented ribbon-like dispersed phase domains in polystyrene/polyamide 6 blends. Chemical Engineering Science**, v. 178, p. 146-156, 2018.
- ZORZANELLI, L. *et al.* Hybrid nanostructures based on polyethylene and polyester fiber residue from platforms offshore: effect of nanoclay as co-compatibilizer agent in immiscible blends. **Fibers and Polymers**, v. 24, p. 195–206, 2023.

Rotas tecnológicas para valorização de resíduos plásticos flutuantes da Baía de Guanabara

Karollyne Gomes de Castro Monsores⁴¹; Ronney Jose Oliveira Santos⁴²; Marcos Vinicios dos Santos Martins⁴³.

Resumo

Este projeto objetiva o desenvolvimento de duas rotas tecnológicas para a valorização de resíduos plásticos flutuantes coletados na Baía de Guanabara. A primeira rota propõe a produção de pequenos barcos a partir do processamento via rotomoldagem dos polímeros recuperados. A segunda visa a fabricação de perfis de madeira plástica por meio do processo de extrusão. As etapas incluem o planejamento da amostragem, caracterização físico-química dos materiais, formulação das composições, processamento dos polímeros, desenvolvimento de protótipos e análise de viabilidade técnica e econômica (EVTE). Espera-se que as formulações resultantes possibilitem a utilização de plásticos reciclados em produtos de maior valor agregado, promovendo a economia circular e gerando impactos socioambientais positivos. A análise de escalabilidade também será realizada, visando a implantação futura em um centro de reciclagem social.

Palavras-chave: Reciclagem de plásticos. Economia circular. Processamento de polímeros. Valorização de resíduos.

Abstract

This project aims to develop two technological routes for the valorization of floating plastic waste collected from Guanabara Bay. The first route proposes the production of small boats through the rotational molding of recovered polymers. The second focuses on manufacturing plastic wood profiles using the extrusion process. The stages include sampling planning, physicochemical characterization of materials, formulation of compositions, polymer processing, prototype development, and technical and economic feasibility analysis (TEFA). The resulting formulations are expected to enable the use of recycled plastics in higher value-added products, promoting the circular economy and generating positive socio-environmental impacts. A scalability analysis will also be conducted, with a view to future implementation in a social recycling center.

Keywords: Plastic recycling. Circular economy. Polymer processing. Waste valorization.

41 Analista de Serviços Tecnológicos II, Firjan SENAI - IST Q&MA. kgomonsores@firjan.com.br.
42 Analista de Serviços Tecnológicos III, Firjan SENAI - IST Q&MA. rjsantos@firjan.com.br.
43 Estagiário de nível superior, Firjan SENAI - IST Q&MA. mavmartins@firjan.com.br.

Introdução

A poluição causada por resíduos plásticos em ambientes marinhos é reconhecida como uma das mais críticas ameaças ao equilíbrio ecológico e à saúde humana (CAPOMACCIO, 2025; ENVIRONMENT, U. N., 2025; ONU, 2021). Estima-se que aproximadamente onze milhões de toneladas de plásticos atinjam os oceanos anualmente, sendo cerca de 80% provenientes de fontes terrestres (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2022; GESAMP, 2015; JAMBECK *et al.*, 2015). A Baía de Guanabara, situada no estado do Rio de Janeiro, ilustra de maneira emblemática esse problema, evidenciando as falhas na gestão integrada de resíduos sólidos urbanos e os impactos adversos sobre a biodiversidade e a qualidade de vida das comunidades ribeirinhas.

Diante desse cenário, o presente projeto propõe o desenvolvimento de duas rotas tecnológicas para a valorização de resíduos plásticos coletados na Baía de Guanabara. A primeira rota visa a fabricação de pequenos barcos por meio da tecnologia de rotomoldagem, enquanto a segunda destina-se à produção de perfis de madeira plástica por extrusão. As atividades envolvem a caracterização físico-química dos materiais recuperados, a formulação de composições adequadas para cada aplicação e a avaliação de viabilidade técnico-econômica, considerando, também, a escalabilidade dos processos.

A elaboração deste trabalho justifica-se pela necessidade de promover alternativas sustentáveis para o reaproveitamento de resíduos plásticos, alinhando-se aos princípios da economia circular (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013) e contribuindo diretamente para o cumprimento de metas estabelecidas nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas. Em especial, a proposta se conecta com os ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e ODS 14 (Vida na Água), além de fomentar o desenvolvimento social e econômico em comunidades vulneráveis, em consonância com o ODS 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico).

Desenvolvimento e resultados

Metodologia

A abordagem metodológica é projetada para promover uma compreensão da viabilidade do uso de plásticos recuperados na produção de novos produtos, a partir de uma perspectiva técnico-ambiental e econômico-social, vide Figura 1.

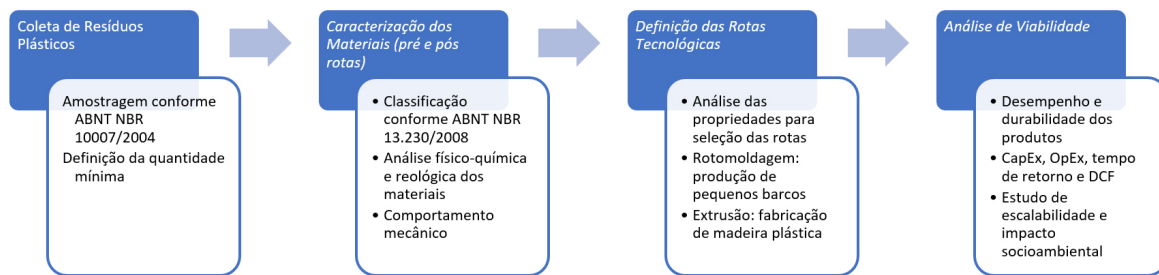
A coleta será realizada na Baía de Guanabara, selecionando-se os principais pontos de acúmulo de resíduos plásticos. A amostragem seguirá a norma ABNT NBR 10007/2004, utilizando técnicas de quarterização para garantir a representatividade das amostras. A quantidade mínima a ser coletada será determinada conforme as necessidades do projeto para cada rota de processamento.

Após a coleta, os plásticos serão classificados conforme a NBR 13.230/2008, que trata da identificação de embalagens plásticas recicláveis. A caracterização físico-química incluirá a análise de densidade, avaliação térmica (TGA e DSC), e análise do comportamento reológico dos materiais. Esses testes fornecerão informações sobre a degradação dos materiais e sua aptidão para o processamento.

Com base nas propriedades dos materiais coletados, serão definidas duas rotas de processamento: a primeira voltada para a produção de pequenos barcos por rotomoldagem, e a segunda destinada à fabricação de madeira plástica por extrusão. A escolha das técnicas será fundamentada na compatibilidade das características dos plásticos recuperados e nas melhores práticas para reutilização de resíduos poliméricos. Os produtos obtidos serão caracterizados quanto às suas propriedades físico-químicas e mecânicas.

A viabilidade técnica e econômica será avaliada com base no custo de processamento, tempo de produção e as condições operacionais de cada rota tecnológica. A escalabilidade do processo será analisada através de uma modelagem econômica, que incluirá a projeção de custos de capital (CapEx), despesas operacionais (OpEx) e fluxo de caixa descontado (DCF) para estimar a viabilidade financeira do projeto em larga escala.

Figura 1. Fluxograma das etapas do projeto.



Resultados esperados

A avaliação técnica dos plásticos flutuantes indicará se os polímeros possuem propriedades suficientes para serem reciclados e utilizados na produção de novos produtos. Espera-se que o processo de caracterização mostre a viabilidade de utilização dos plásticos recuperados para a fabricação de barcos e madeira plástica. Além disso, a análise térmica e reológica fornecerá informações sobre os ajustes necessários nos parâmetros de processamento, como zonas de temperatura, torque e tempo de processamento, para garantir a qualidade do produto final. Os testes mecânicos, como a análise de resistência à tração e flexão, fornecerão dados sobre o comportamento mecânico dos materiais produzidos. A expectativa é que as formulações ajustadas com aditivos e reforços (como fibras e nucleadores) apresentem características comparáveis às dos materiais virgens, contribuindo para a criação de produtos funcionais e de maior valor agregado.

Os resultados esperados também incluem a geração de novos empregos nas comunidades locais, com a possível criação de um centro de reciclagem social. A transformação dos resíduos plásticos em novos produtos pode representar uma oportunidade de desenvolvimento econômico para a região. Além disso, o impacto ambiental será mensurado pela quantidade de plásticos retirados do ecossistema marinho, durante a vigência do projeto, contribuindo para a recuperação da Baía de Guanabara.

A análise de viabilidade econômica do projeto será baseada nos indicadores financeiros tradicionais (NPV, IRR, Payback), com a projeção de retorno positivo sobre o investimento após um período inicial de implantação e ajuste operacional. Espera-se que o projeto também promova a conscientização ambiental e incentive práticas sustentáveis dentro da comunidade local.

Conclusão

Por meio do desenvolvimento das rotas tecnológicas para o reaproveitamento de plásticos coletados no presente projeto, espera-se que os produtos obtidos apresentem características adequadas em termos de resistência mecânica e térmica. A iniciativa contribui para os ODS 12, 13 e 14, promovendo a economia circular e a redução da poluição marinha. A análise de viabilidade econômica, com base em indicadores financeiros, deve comprovar a viabilidade do projeto, gerando impacto ambiental positivo e criando oportunidades de emprego nas comunidades locais. Além disso, o projeto possui grande importância para a indústria do estado do Rio de Janeiro, ao oferecer novas soluções para a gestão de resíduos plásticos e potencializar a produção de materiais sustentáveis. Isso pode abrir portas para a adoção de práticas mais ecológicas e rentáveis dentro do setor industrial local, promovendo inovação e sustentabilidade no mercado.

Referências

CAPOMACCIO, S. **Poluição plástica é a segunda maior ameaça ambiental ao planeta**. *Jornal da USP*, 2025. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/atualidades/poluicao-plastica-e-a-segunda-maior-ameaca-ambiental-ao-planeta/>>. Acesso em: 29 abr. 2025.

MACARTHUR, E. *et al.* Towards the circular economy. *Journal of industrial ecology*, v. 2, n. 1, p. 23-44, 2013.

Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. **Poluição plástica**. 2025. Disponível em: <<https://www.unep.org/pt-br/poluicao-plastica>>. Acesso em: 29 abr. 2025.

Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection (GESAMP). **Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment**. Reports and Studies n. 90, 2015. Disponível em: <<http://www.gesamp.org/publications/reports-and-studies-no-90>>. Acesso em: 29 abr. 2025.

JAMBECK, J. R. *et al.* Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, v. 347, n. 6223, p. 768-771, 2015.

Redação National Geographic. **A rota do plástico: do lixo aos ecossistemas marinhos**. National Geographic Brasil, 20 abr. 2022. Disponível em: <<https://www.nationalgeographicbrasil.com/meio-ambiente/2022/04/a-rota-do-plastico-do-lixo-aos-ecossistemas-marinhos>>. Acesso em: 29 abr. 2025.

United Nations Environment Programme. **Relatório da ONU sobre poluição plástica alerta sobre falsas soluções e confirma necessidade de ação global urgente**. 21 out. 2021. Disponível em: <<https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/relatorio-da-onu-sobre-poluicao-plastica-alerta-sobre>>. Acesso em: 29 abr. 2025.

Sistema ultrassônico de medição sem contato por método diferencial para avaliação da espessura de correias transportadoras

Rubens Lincoln Santana Blazutti Marçal⁴⁴, Felipe Rebelo Lopes⁴⁵

Resumo

Correias transportadoras representam o elo de escoamento de produção em plantas de mineração, siderurgia e terminais portuários. A perda gradual de espessura por abrasão é o principal indicador de fim de vida útil; entretanto, os métodos tradicionais de inspeção exigem contato físico e parada da linha, elevando custos e riscos operacionais. Este artigo descreve o desenvolvimento de um sistema ultrassônico sem contato, operando em configuração diferencial, capaz de medir, em tempo real, a espessura de correias em condições estáticas e dinâmicas. Dois transdutores de acoplamento aéreo foram posicionados em faces opostas da correia, separados por uma distância fixa previamente calibrada. A espessura da correia é inferida pela diferença entre essa distância pré-fixada e a soma dos tempos de voo (ToF) individuais convertidos em distância. Os resultados indicam que o sistema de medição é viável e compatível com plataformas IoT para manutenção preditiva, alinhando-se aos princípios da Indústria 4.0.

Palavras-chave: Ultrassom sem contato. Correias transportadoras. Inspeção não destrutiva. Manutenção preditiva.

Abstract

Conveyor belts constitute the productionflow backbone of mining, steelmaking, and port facilities. Gradual thickness loss due to abrasion is the primary endoflife indicator; however, conventional inspection methods require physical contact and line stoppage, raising both costs and operational risks. This paper describes the development of a noncontact ultrasonic system, operating in a differential configuration, capable of measuring belt thickness in real time under both static and dynamic conditions. Two aircoupled transducers are mounted on opposite faces of the belt, separated by a precalibrated fixed gap. Belt thickness is inferred from the difference between this preset distance and the sum of the individually measured timeofflight (ToF) values converted to distance. The results indicate that the measurement system is feasible and compatible with IoT platforms for predictive maintenance, fully aligned with Industry 4.0 principles.

Keywords: Noncontact ultrasound. Conveyor belts. Nondestructive testing. Predictive maintenance.

44 Pesquisador QMS II, ISI Inspeção e Integridade. rlsbmarcal@firjan.com.br

45 Pesquisador QMS III, ISI Inspeção e Integridade. frlopes@firjan.com.br

Introdução

Correias transportadoras são responsáveis por até 60 % do custo total de transporte interno em operações de granéis sólidos. Em plantas de minério de ferro, por exemplo, uma parada emergencial pode acarretar perdas superiores a US\$ 100.000,00 por hora (MINING TECHNOLOGY, 2020). A principal causa dessas interrupções é a falha catastrófica da correia, cuja progressão está fortemente correlacionada com a redução da espessura da camada de cobertura de borracha (KIRJANÓWBŁAŻEJ *et al.*, 2022).

Inspeções convencionais de espessura utilizam paquímetros ou ultrassom de contato todos exigindo acesso direto e, frequentemente, desligamento do transportador (MINING TECHNOLOGY, 2020). Paralelamente, a consolidação de estratégias de manutenção preditiva e a disseminação de arquiteturas Indústria 4.0 impulsionam a demanda por sensores remotos, integráveis a redes industriais e capazes de operar inline sem intervenção humana (GHOSE; BALASUBRAMANIAM, 2013).

Neste contexto, técnicas ultrassônicas como o acoplamento aéreo despontam como solução atrativa: eliminam acoplantes líquidos, reduzem a contaminação do produto e permitem medições a distância (SONOTEC, 2019; 2021).

Desenvolvimento e resultados

Metodologia

Princípio de Medição

Dois transdutores piezelétricos de acoplamento aéreo (40 kHz) foram montados axialmente opostos em suporte ajustável, separados por um vão d_0 calibrado a $24,8 \pm 0,02$ mm. Cada transdutor opera alternadamente como transmissor e receptor, gerando e recebendo pulsos ultrassônico. O tempo de voo no ar (ToF_1 , ToF_2) é medido pelo sensor em μs e a distância do sensor até a correia é calculada pelo software multiplicando-se a velocidade do som no ar e o tempo gasto pelo pulso para ir e voltar da correia. Sendo assim, a espessura pode ser inferida como sendo a diferença entre o vão dos sensores (predefinido) e a soma das distâncias dos sensores até a correia (valores medidos). Logo, a espessura é dada por:

$$e = d_0 - (v_{ar} * ToF_1 + v_{ar} * ToF_2)$$

onde, e é a espessura, v_{ar} é a velocidade do som no ar, e ToF_1 e ToF_2 são os tempos de voo que o pulso ultrassônico leva para ir e voltar do alvo.

Desenvolvimento da bancada experimental

Um sistema para testar o princípio físico de funcionamento foi montado sendo composto por:

- Suporte ajustável de bancada;
- Correia protótipo com 0,3 mm de espessura;
- Dupla de sensores ultrassônicos de distância HC-SR04;
- Placa protoboard;
- Arduino;
- Computador com software de processamento Arduino 2.3.6.

A seguir, na Figura 1, é mostrado o sistema montado, composto pelo suporte ajustável, a dupla de sensores ultrassônicos, a protoboard, o Arduino e um notebook para rodar o software Arduino 2.3.6.

Figura 1. Sistema de medição montado em bancada



Resultados e discussão

Uma sequência de medição foi registrada e os valores medidos encontram-se na tabela a seguir:

Distância 1 (mm)	Distância 2 (mm)	Espessura (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão
12,83	11,55	0,42	0,33	0,1
12,96	11,55	0,3		
12,82	11,55	0,4		
12,96	11,65	0,2		

A partir da medição é possível calcular que a média da espessura medida foi 0,33 mm e o desvio padrão 0,1. Outro resultado encontrado nas medições são as distâncias entre os sensores e a correia, que tiveram médias e desvios padrão de 12,89 mm \pm 0,08 para o sensor superior e 11,56 \pm 0,05 para o sensor inferior.

Vale ressaltar que pelo caráter experimental do sistema de medição o erro de medida ainda é alto (0,03 mm), isso devido a duas razões principais:

1. Sensores ultrassônicos não calibrados;
2. O suporte superior não permitiu a perfeita fixação do sensor ultrassônico, mantendo um ângulo em relação à correia durante as medições.

Essas limitações da bancada experimental revelam o ponto forte do sistema de medição ultrassônico sem contato, mesmo utilizando sensores sem calibração e encontrando dificuldades em manter o perfeito paralelismo entre o sensor e a correia foi possível medir de forma contínua e com limitada precisão a espessura da correia.

O método de medição diferencial é imune a movimentações e vibrações da correia, já que ao se utilizar uma dupla de sensores medindo a mesma região da correia, porém em faces opostas, a correia, ao se movimentar para perto de um sensor, conseqüentemente se afasta do outro, gerando uma medição constante da espessura da correia.

Conclusão

O sistema de medição ultrassônico diferencial por acoplamento aéreo sem contato demonstrou viabilidade do princípio físico de funcionamento e alta repetibilidade das medições. Comparado a ultrassom de contato e medidores mecânicos o sistema proposto equilibra precisão e viabilidade operacional contínua.

Referências

Mining Technology. **\$1 million an hour: the cost of ineffective level measurement at conveyor belt transfer systems.** 24 jan. 2020. Disponível em: <<https://www.mining-technology.com/features/1-million-an-hour-the-cost-of-ineffective-level-measurement-at-conveyor-belt-transfer-systems/>>. Acesso em: 29 abr. 2025.

KirjanówBłażej, A. *et al.* Innovative diagnostic device for thickness measurement of conveyor belts in horizontal transport. **Scientific Reports**, v. 12, n. 7212, 2022.

Ghose, B.; Balasubramaniam, K. Air Coupled Ultrasonic Inspection of Steel–Rubber Interface. **AsiaPacific Conference on NDT (APCNDT)**, 2013.

SONOTEC GmbH. Ultrasonic Thickness Testing of Reinforced Rubber Conveyor Belts. **eJournal of Nondestructive Testing (NDT.net)**, 2019.

SONOTEC USA. Ultrasonic Testing in Mining – Testing the Thickness of Reinforced Rubber Conveyor Belts. **Application Note**, 2021.

Firjan SENAI
 SESI