

MEIO AMBIENTE E CIÊNCIAS AGRÁRIAS

DESAFIOS E SOLUÇÕES PARA UM FUTURO
SUSTENTÁVEL

VOLUME IV



YÁSCARA MAIA ARAÚJO DE BRITO
HIGOR COSTA DE BRITO
ORGANIZADORES

MEIO AMBIENTE E CIÊNCIAS AGRÁRIAS

DESAFIOS E SOLUÇÕES PARA UM FUTURO SUSTENTÁVEL

VOLUME IV



YÁSCARA MAIA ARAÚJO DE BRITO
HIGOR COSTA DE BRITO
ORGANIZADORES



2026 - Ampla Editora

Copyright © Ampla Editora

Editor Chefe: Leonardo Tavares

Design da Capa: Ampla Editora

Meio ambiente e ciências agrárias: desafios e soluções para um futuro sustentável – Volume IV está licenciado sob CC BY 4.0.



Essa licença permite que outros remixem, adaptem e desenvolvam seu trabalho para fins não comerciais e, embora os novos trabalhos devam ser creditados e não possam ser usados para fins comerciais, os usuários não precisam licenciar esses trabalhos derivados sob os mesmos termos. O conteúdo da obra e sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores e não representam a posição oficial da Ampla Editora. O download e o compartilhamento da obra são permitidos, desde que os autores sejam reconhecidos. Todos os direitos desta edição foram cedidos à Ampla Editora.

Catálogo na publicação

Elaborada por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

M514

Meio ambiente e ciências agrárias: desafios e soluções para um futuro sustentável / Organização de Yáscara Maia Araújo de Brito, Higor Costa de Brito. – Campina Grande/PB: Ampla, 2026.

(Meio ambiente e ciências agrárias, V. 4)

Livro em PDF

ISBN 978-65-5381-370-0

DOI 10.51859/ampla.mac6200-0

1. Meio ambiente. 2. Ciências agrárias. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Brito, Yáscara Maia Araújo de (Organizadora). II. Brito, Higor Costa de (Organizador). III. Título.

CDD 333.7

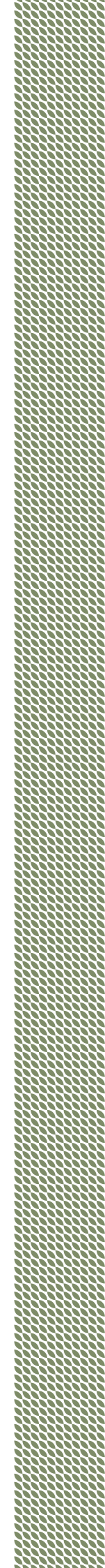
Índice para catálogo sistemático

I. Meio ambiente

CONSELHO EDITORIAL

Adilson Tadeu Basquerote – Centro Universitário para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí
Alexander Josef Sá Tobias da Costa – Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Andréa Cátia Leal Badaró – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Andréia Monique Lermen – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Antoniele Silvana de Melo Souza – Universidade Estadual do Ceará
Aryane de Azevedo Pinheiro – Universidade Federal do Ceará
Bergson Rodrigo Siqueira de Melo – Universidade Estadual do Ceará
Bruna Beatriz da Rocha – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais
Bruno Ferreira – Universidade Federal da Bahia
Caio Augusto Martins Aires – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Caio César Costa Santos – Universidade Federal de Sergipe
Carina Alexandra Rondini – Universidade Estadual Paulista
Carla Caroline Alves Carvalho – Universidade Federal de Campina Grande
Carlos Augusto Trojaner – Prefeitura de Venâncio Aires
Carolina Carbonell Demori – Universidade Federal de Pelotas
Caroline Barbosa Vieira – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul
Christiano Henrique Rezende – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Cícero Batista do Nascimento Filho – Universidade Federal do Ceará
Clécio Danilo Dias da Silva – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Dandara Scarlet Sousa Gomes Bacelar – Universidade Federal do Piauí
Daniela de Freitas Lima – Universidade Federal de Campina Grande
Darlei Gutierrez Dantas Bernardo Oliveira – Universidade Estadual da Paraíba
Denilson Paulo Souza dos Santos – Universidade Estadual Paulista
Denise Barguil Nepomuceno – Universidade Federal de Minas Gerais
Dinara das Graças Carvalho Costa – Universidade Estadual da Paraíba
Diogo Lopes de Oliveira – Universidade Federal de Campina Grande
Dylan Ávila Alves – Instituto Federal Goiano
Edson Lourenço da Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
Elane da Silva Barbosa – Universidade Estadual do Ceará
Érica Rios de Carvalho – Universidade Católica do Salvador
Fábio Ronaldo da Silva – Universidade do Estado da Bahia
Fernanda Beatriz Pereira Cavalcanti – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Fredson Pereira da Silva – Universidade Estadual do Ceará
Gabriel Gomes de Oliveira – Universidade Estadual de Campinas
Gilberto de Melo Junior – Instituto Federal do Pará
Givanildo de Oliveira Santos – Instituto Brasileiro de Educação e Cultura
Glécia Morgana da Silva Marinho – Pontifícia Universidad Católica Argentina Santa Maria de Buenos Aires (UCA)
Higor Costa de Brito – Universidade Federal de Campina Grande
Hugo José Coelho Corrêa de Azevedo – Fundação Oswaldo Cruz
Igor Lima Soares – Universidade Federal do Ceará
Isabel Fontgalland – Universidade Federal de Campina Grande
Isane Vera Karsburg – Universidade do Estado de Mato Grosso
Israel Gondres Torné – Universidade do Estado do Amazonas
Ivo Batista Conde – Universidade Estadual do Ceará
Jaqueline Rocha Borges dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Jessica Wanderley Souza do Nascimento – Instituto de Especialização do Amazonas
João Henriques de Sousa Júnior – Universidade Federal de Santa Catarina
João Manoel Da Silva – Universidade Federal de Alagoas
João Vitor Andrade – Universidade de São Paulo
Joilson Silva de Sousa – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
José Cândido Rodrigues Neto – Universidade Estadual da Paraíba
Jose Henrique de Lacerda Furtado – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Josenita Luiz da Silva – Faculdade Frassinetti do Recife
Josiney Farias de Araújo – Universidade Federal do Pará
Karina de Araújo Dias – SME/Prefeitura Municipal de Florianópolis
Katia Fernanda Alves Moreira – Universidade Federal de Rondônia
Laís Portugal Rios da Costa Pereira – Universidade Federal de São Carlos
Laíze Lantyer Luz – Universidade Católica do Salvador
Lara Luiza Oliveira Amaral – Universidade Estadual de Campinas
Lindon Johnson Pontes Portela – Universidade Federal do Oeste do Pará
Lisiane Silva das Neves – Universidade Federal do Rio Grande
Lucas Araújo Ferreira – Universidade Federal do Pará
Lucas Capita Quarto – Universidade Federal do Oeste do Pará
Lúcia Magnólia Albuquerque Soares de Camargo – Unifacisa Centro Universitário
Luciana de Jesus Botelho Sodré dos Santos – Universidade Estadual do Maranhão
Luís Miguel Silva Vieira – Universidade da Madeira
Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas
Luiza Catarina Sobreira de Souza – Faculdade de Ciências Humanas do Sertão Central
Manoel Mariano Neto da Silva – Universidade Federal de Campina Grande
Marcelo Alves Pereira Eufrazio – Centro Universitário Unifacisa
Marcelo Henrique Torres de Medeiros – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Marcelo Williams Oliveira de Souza – Universidade Federal do Pará
Marcos Pereira dos Santos – Faculdade Rachel de Queiroz
Marcus Vinicius Peralva Santos – Universidade Federal da Bahia
Maria Carolina da Silva Costa – Universidade Federal do Piauí
Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas
Marina Magalhães de Moraes – Universidade Federal do Amazonas
Mário César de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia
Michele Antunes – Universidade Feevale
Michele Aparecida Cerqueira Rodrigues – Logos University International
Miguel Ysrael Ramírez-Sánchez – Universidade Autônoma do Estado do México
Milena Roberta Freire da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
Nadja Maria Mourão – Universidade do Estado de Minas Gerais
Natan Galves Santana – Universidade Paranaense
Nathalia Bezerra da Silva Ferreira – Universidade do Estado do Rio Grande do Norte
Neide Kazue Sakugawa Shinohara – Universidade Federal Rural de Pernambuco
Neudson Johnson Martinho – Faculdade de Medicina da Universidade Federal de Mato Grosso
Patrícia Appelt – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Paula Milena Melo Casais – Universidade Federal da Bahia
Paulo Henrique Matos de Jesus – Universidade Federal do Maranhão
Rafael Rodrigues Gomides – Faculdade de Quatro Marcos
Ramôn da Silva Santos – Universidade Federal Rural de Pernambuco
Reângela Cíntia Rodrigues de Oliveira Lima – Universidade Federal do Ceará
Rebeca Freitas Ivanicska – Universidade Federal de Lavras
Regina Márcia Soares Cavalcante – Universidade Federal do Piauí
Renan Gustavo Pacheco Soares – Autarquia do Ensino Superior de Garanhuns
Renan Monteiro do Nascimento – Universidade de Brasília
Ricardo Leoni Gonçalves Bastos – Universidade Federal do Ceará
Rodrigo da Rosa Pereira – Universidade Federal do Rio Grande
Rubia Katia Azevedo Montenegro – Universidade Estadual Vale do Acaraú
Sabrynna Brito Oliveira – Universidade Federal de Minas Gerais
Samuel Miranda Mattos – Universidade Estadual do Ceará
Selma Maria da Silva Andrade – Universidade Norte do Paraná
Shirley Santos Nascimento – Universidade Estadual Do Sudoeste Da Bahia
Silvana Carloto Andres – Universidade Federal de Santa Maria
Silvio de Almeida Junior – Universidade de Franca
Tatiana Paschoalette R. Bachur – Universidade Estadual do Ceará | Centro Universitário Christus
Telma Regina Stroparo – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Thayla Amorim Santino – Universidade Federal do Rio Grande do Norte



Thiago Sebastião Reis Contrato – Universidade Federal do Rio de Janeiro
Tiago Silveira Machado – Universidade de Pernambuco
Valvenarg Pereira da Silva – Universidade do Estado de Mato Grosso
Vinícius Queiroz Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia
Virgínia Maia de Araújo Oliveira – Instituto Federal da Paraíba
Virginia Tomaz Machado – Faculdade Santa Maria de Cajazeiras
Walmir Fernandes Pereira – Miami University of Science and Technology
Wanessa Dunga de Assis – Universidade Federal de Campina Grande
Wellington Alves Silva – Universidade Estadual de Roraima
William Roslindo Paranhos – Universidade Federal de Santa Catarina
Yáscara Maia Araújo de Brito – Universidade Federal de Campina Grande
Yasmin da Silva Santos – Fundação Oswaldo Cruz
Yuciara Barbosa Costa Ferreira – Universidade Federal de Campina Grande

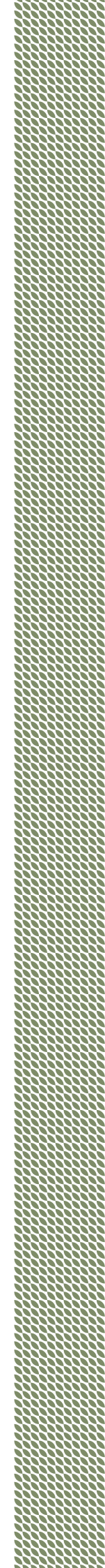
PREFÁCIO

A intensificação das mudanças climáticas, a perda de biodiversidade, a degradação dos solos, a contaminação dos ecossistemas e a crescente demanda por alimentos e energia tornam insuficientes as abordagens que tratam produção e conservação como campos separados. Nesse contexto, pensar um futuro sustentável requer compreender os sistemas produtivos em sua complexidade, considerando os processos ecológicos, as condições socioeconômicas, as desigualdades territoriais e as possibilidades abertas pelo conhecimento científico e pela inovação tecnológica.

A coletânea **Meio ambiente e ciências agrárias: desafios e soluções para um futuro sustentável** insere-se nesse debate ao reunir estudos que examinam diferentes dimensões da sustentabilidade em ambientes rurais, florestais e urbanos. Os trabalhos contemplam escalas que variam da estrutura agrária municipal aos processos fisiológicos e bioquímicos observados em sementes e mudas. Essa diversidade permite reconhecer que os problemas ambientais não se restringem à disponibilidade de recursos naturais.

Uma das questões presentes na obra é a organização do espaço agrário brasileiro e seus efeitos sobre a produção, a distribuição de oportunidades e a conservação dos recursos naturais. As análises sobre estrutura fundiária, uso da terra, agricultura familiar e crédito rural evidenciam desigualdades históricas que condicionam a capacidade dos produtores de investir, adaptar-se às mudanças ambientais e adotar técnicas mais eficientes. Em regiões como o Semiárido e a Amazônia, essas condições assumem configurações próprias, determinadas pelas características climáticas, pela disponibilidade hídrica, pela diversidade sociocultural e pelas formas de ocupação do território. A sustentabilidade dos sistemas produtivos depende, portanto, tanto do manejo dos recursos naturais quanto da formulação de políticas capazes de ampliar o acesso aos meios de produção e reduzir assimetrias regionais.

Ao articular questões territoriais, produtivas, tecnológicas, ecológicas e educacionais, esta coletânea oferece um retrato da amplitude das ciências agrárias e ambientais. Os estudos demonstram que não existe uma solução única para os desafios da sustentabilidade. Há, em seu lugar, um conjunto de conhecimentos, métodos e



experiências que precisam ser avaliados segundo as condições ambientais e sociais de cada contexto. É nesse encontro entre pesquisa aplicada, planejamento e responsabilidade coletiva que se encontram possibilidades concretas para compatibilizar produção, conservação e qualidade de vida.

Boa leitura!

Higor Costa de Brito

Doutor em Engenharia Civil e Ambiental

SUMÁRIO

CAPÍTULO I. ESTRUTURA AGRÁRIA E USO DA TERRA NO SEMIÁRIDO IRRIGADO: O QUE O CENSO AGROPECUÁRIO 2017 REVELA SOBRE IPANGUAÇU (RIO GRANDE DO NORTE).....	10
CAPÍTULO II. DESAFIOS SOCIOAMBIENTAIS NA DISTRIBUIÇÃO EQUITATIVA DE CRÉDITO RURAL NO BRASIL E NA AMAZÔNIA.....	23
CAPÍTULO III. AGROECOSSISTEMAS AMAZÔNICOS E SUSTENTABILIDADE: CAMINHOS PARA SISTEMAS PRODUTIVOS RESILIENTES NA AGRICULTURA FAMILIAR.....	39
CAPÍTULO IV. PERSPECTIVAS E EVIDÊNCIAS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL NA AMAZÔNIA.....	52
CAPÍTULO V. ANÁLISE ESPACIAL DO USO E COBERTURA DO SOLO EM ÁREAS ANTROPIZADAS, EM DISTRITOS DA REGIÃO DE UNAÍ-MG	66
CAPÍTULO VI. GEOPROCESSAMENTO APLICADO AO ESTUDO DA EXPANSÃO CANAVIEIRA NO CERRADO SUL GOIANO ENTRE OS ANOS DE 2006, 2010 E 2014	79
CAPÍTULO VII. AGRICULTURA DE PRECISÃO E SENSORIAMENTO REMOTO SOB PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E PRODUTIVIDADE NA CULTURA DA SOJA.....	92
CAPÍTULO VIII. PLANILHA ELETRÔNICA COMO FERRAMENTA PARA A SELEÇÃO E DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS OPERACIONAIS DE MÁQUINAS E IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS TRATORIZADOS.....	110
CAPÍTULO IX. BOAS PRÁTICAS NA OBTENÇÃO E COLETA DE LEITE PARA FINS DE ANÁLISE.....	118
CAPÍTULO X. DIVERSIDADE DE PIMENTAS EM PROPRIEDADE RURAL DE ALTA FLORESTA - MT	132
CAPÍTULO XI. ARBORIZAÇÃO DE PRAÇAS EM CONTEXTOS URBANOS: UMA REVISÃO NARRATIVA EM UMA CAPITAL DA AMAZÔNIA BRASILEIRA	139
CAPÍTULO XII. GESTÃO DE RESÍDUOS E CONSCIÊNCIA COLETIVA: O CASO DE CORONEL JOÃO PESSOA/RN	151
CAPÍTULO XIII. EFEITO DO HIDROCONDICIONAMENTO SOBRE A GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE ANADENANTHERA COLUBRINA (VELL.) BRENAN SUBMETIDAS AO ESTRESSE TÉRMICO	162
CAPÍTULO XIV. HIDRATAÇÃO PRÉ-SEMEADURA E VIGOR DE SEMENTES DE <i>PTEROGYNE NITENS</i> (FABACEAE) SUBMETIDAS A DIFERENTES PERÍODOS DE EMBEBIÇÃO	176

CAPÍTULO XV. APLICAÇÃO DE MICRORGANISMOS NATIVOS DA AMAZÔNIA NA PROMOÇÃO DE CRESCIMENTO DE MUDAS ENXERTADAS DE CACAU (<i>THEOBROMA CACAO</i>)	186
CAPÍTULO XVI. ADUBAÇÃO FOSFATADA NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE <i>HYMENAEA COURBARIL</i> L. PARA RESTAURAÇÃO DE ECOSISTEMAS DEGRADADOS.....	198
CAPÍTULO XVII. MECANISMOS DE TOXICIDADE DO CÁDMIO EM ESPÉCIES VEGETAIS E O PAPEL DO 5-ALA: UMA REVISÃO DE LITERATURA	212
CAPÍTULO XVIII. AÇÃO DO ÁCIDO 5-AMINOLEVULÍNICO NO METABOLISMO DO NITROGÊNIO DE MUDAS DE PALHETEIRA (<i>CLITORIA FAIRCHILDIANA</i>) SUBMETIDAS A DOSES DE CÁDMIO	223
CAPÍTULO XIX. INDICADORES ECOLÓGICOS NA RESTAURAÇÃO DE FLORESTAS RIPÁRIAS NA AMAZÔNIA IMPACTADAS PELA MINERAÇÃO DE ESTANHO: UMA REVISÃO DE LITERATURA.....	238
CAPÍTULO XX. BIOSURFACTANTES MICROBIANOS NA REMEDIAÇÃO AMBIENTAL DE CONTAMINANTES PETROLÍFEROS: UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL	251
CAPÍTULO XXI. APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE COPA DE IPÊ (<i>HANDROANTHUS SERRATIFOLIUS</i>) PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO EM FORNO DE ALVENARIA: CARACTERÍSTICAS QUALITATIVAS	265
CAPÍTULO XXII. PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CARVÃO VEGETAL DE <i>BAMBUSA VULGARIS</i> SCHRAD. PARA USO ENERGÉTICO	277
CAPÍTULO XXIII. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO USO DE BIOMORDENTES NO TINGIMENTO DO ALGODÃO COM CORANTES DE ORIGEM VEGETAL.....	288
CAPÍTULO XXIV. O ENSINO DE QUÍMICA COMO FERRAMENTA PARA A SUSTENTABILIDADE: DISCUTINDO POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E MODELOS ECONÔMICOS.....	297

CAPÍTULO I

ESTRUTURA AGRÁRIA E USO DA TERRA NO SEMIÁRIDO IRRIGADO: O QUE O CENSO AGROPECUÁRIO 2017 REVELA SOBRE IPANGUAÇU (RIO GRANDE DO NORTE)

AGRARIAN STRUCTURE AND LAND USE IN THE IRRIGATED SEMIARID: WHAT THE 2017 AGRICULTURAL CENSUS REVEALS ABOUT IPANGUAÇU (RIO GRANDE DO NORTE, BRAZIL)

DOI: 10.51859/ampla.mac6200-1

Manoel Ciricio Pereira Neto¹

¹ Doutor em Geografia. Professor da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte – UERN.

RESUMO

O Censo Agropecuário do IBGE constitui o mais completo retrato estrutural da atividade agropecuária brasileira, de periodicidade aproximadamente decenal. Este capítulo caracteriza a estrutura fundiária, o uso da terra, os sistemas produtivos e a força de trabalho do município de Ipanguaçu, no Vale do Açu (Rio Grande do Norte), inserido no semiárido brasileiro, a partir dos resultados definitivos do Censo Agropecuário 2017. O tratamento dos dados, obtidos no nível municipal junto ao Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA), baseou-se em estatística descritiva. Os resultados revelam 502 estabelecimentos agropecuários ocupando 18.909 ha (área média de 37,7 ha), dos quais 13,7% são irrigados — proporção muito superior ao padrão do interior semiárido. A fruticultura permanente irrigada (banana, manga e mamão) gera cerca de R\$ 34,5 milhões em valor de produção, contra aproximadamente R\$ 0,95 milhão da lavoura temporária de sequeiro, e 58,6% da mão de obra ocupada não possui laço de parentesco com o produtor. Tais evidências configuram a coexistência de dois sistemas produtivos contrastantes no mesmo território — um agronegócio frutícola irrigado, capitalizado e assalariado, sobreposto a uma agropecuária familiar de sequeiro —, arranjo que carrega implicações socioambientais relevantes quanto ao uso da água, à conservação da Caatinga e à vulnerabilidade das famílias rurais.

Palavras-chave: Geografia agrária. Semiárido brasileiro. Fruticultura irrigada. Censo Agropecuário. Vale do Açu.

ABSTRACT

The IBGE Agricultural Census is the most comprehensive structural portrait of Brazilian agriculture, conducted at roughly decadal intervals. This chapter characterizes the land tenure structure, land use, production systems and labour force of the municipality of Ipanguaçu, in the Açu Valley (Rio Grande do Norte state), located within the Brazilian semiarid region, drawing on the definitive results of the 2017 Agricultural Census. Municipal-level data, retrieved from the IBGE Automatic Retrieval System (SIDRA), were analysed through descriptive statistics. Results reveal 502 agricultural establishments covering 18,909 ha (mean area of 37.7 ha), of which 13.7% are irrigated — a share far above the standard of the semiarid interior. Irrigated permanent fruit crops (banana, mango and papaya) generate about BRL 34.5 million in production value, against roughly BRL 0.95 million from rainfed temporary crops, and 58.6% of the occupied labour force has no kinship ties to the producer. This evidence indicates the coexistence of two contrasting production systems within the same territory — an irrigated, capitalized and wage-based fruit agribusiness superimposed on a rainfed family farming base —, an arrangement with significant socio-environmental implications regarding water use, Caatinga conservation and the vulnerability of rural families.

Keywords: Agrarian geography. Brazilian semiarid. Irrigated fruit growing. Agricultural Census. Açu Valley.

1. INTRODUÇÃO

O semiárido brasileiro, em sua delimitação oficial (Resolução nº 176/2024 do CONDEL/SUDENE), reúne 1.477 municípios e ocupa cerca de 15,3% do território nacional. Trata-se de uma região caracterizada por precipitações reduzidas e irregulares, elevada evapotranspiração e déficit hídrico estrutural definem o ambiente em que se estende a Caatinga, único bioma exclusivamente brasileiro e hoje um dos mais degradados do país.

Nesse contexto, a atividade agropecuária organizou-se tradicionalmente em torno da pecuária extensiva e de uma agricultura de sequeiro de subsistência (feijão, milho e mandioca), sob a lógica da “convivência com a seca/semiárido”. A partir das últimas décadas do século XX, porém, esse quadro passou a conviver com um vetor de transformação: a irrigação dos vales úmidos. No Rio Grande do Norte, a Barragem Armando Ribeiro Gonçalves (1983) viabilizou a fruticultura irrigada no Vale do Açu, configurando o que a literatura denomina “ilhas de modernização agrícola” — subespaços em que a combinação entre capital privado e ação estatal faz emergir uma agricultura científica globalizada em meio a uma matriz regional pouco dinâmica (Araújo, 2000 *apud* Alves; Aquino; Silva Filho, 2018).

Essa modernização foi induzida pelo Estado e marcadamente seletiva. No Baixo-Açu, das fases previstas pelo Projeto Baixo-Açu apenas a barragem se concretizou plenamente, enquanto o perímetro irrigado destinado aos pequenos colonos foi “esquecido” (Albano; Sá, 2008) — e isso ao custo da desapropriação de cerca de 3.955 famílias e da submersão da antiga sede de São Rafael (Santos, 2019). Assegurada a água sem a democratização do acesso à terra, grupos capitalizados ocuparam as várzeas mais férteis; em Ipanguaçu, o processo culminou na chegada da multinacional Del Monte (1993), que fez do município a “capital nacional da banana” (Alves; Aquino; Silva Filho, 2018).

O dinamismo frutícola, contudo, não gerou desenvolvimento social equivalente, configurando um “espaço agrícola de exclusão” (Elias, 2006 *apud* Alves; Aquino; Silva Filho, 2018) em que a riqueza convive com a dependência de transferências sociais. Apesar desse avanço empresarial, a agricultura familiar permanece numericamente dominante: segundo o Censo Agropecuário 2017, 75,35% dos estabelecimentos da microrregião são familiares, embora ocupem apenas 37,56% da área, sendo o município de Ipanguaçu justamente um dos municípios em que sua participação é menor, por concentrar os maiores empreendimentos da fruticultura irrigada (Aquino et al., 2023).

Dimensionar essa coexistência tensa exige uma fonte capaz de retratar a estrutura agrária em sua totalidade. O Censo Agropecuário do IBGE de cobertura universal e periodicidade decenal cumpre esse papel, sendo o levantamento de 2017 a base empírica deste capítulo. Assim, esse trabalho tem o objetivo de caracterizar a estrutura fundiária, o uso e a cobertura das terras, os sistemas produtivos e a força de trabalho de Ipanguaçu a partir do último Censo agrícola, evidenciando a coexistência entre o agronegócio frutícola irrigado e a agropecuária familiar de sequeiro, bem como suas implicações socioambientais. Trata-se de um retrato estrutural que, embora não capte trajetórias, permite dimensionar com precisão a heterogeneidade interna de um município do semiárido irrigado.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O município de Ipanguaçu localiza-se na porção centro-norte do Rio Grande do Norte, na microrregião do Vale do Açu (Baixo-Açu), mesorregião Central Potiguar, integralmente inserido nos limites oficiais do semiárido brasileiro. Banhado pelo rio Açu e situado a jusante da Barragem Armando Ribeiro Gonçalves, o município reúne tanto áreas de várzea aptas à agricultura irrigada quanto extensões de tabuleiros e sertão recobertas por Caatinga — domínio morfoclimático marcado por forte aridez sazonal, temperaturas médias entre 25 e 29 °C e precipitações anuais da ordem de 750 a 800 mm (Ab'Sáber, 2003), característica que o torna especialmente adequado à análise da heterogeneidade agrária regional.

Os dados utilizados provêm integralmente do *Censo Agropecuário 2017 — Resultados Definitivos* (IBGE, 2019), agregados ao nível municipal e obtidos por meio do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA). Foram consideradas as seguintes dimensões: (I) estrutura dos estabelecimentos (número, área total, condição legal do produtor e condição do produtor em relação às terras); (II) utilização das terras; (III) lavoura permanente e lavoura temporária (número de estabelecimentos, área, quantidade produzida e valor da produção); (IV) efetivo dos rebanhos; e (V) pessoal ocupado, segundo o laço de parentesco com o produtor, o sexo e a condição de permanência. O tratamento dos dados restringiu-se à estatística descritiva.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. ESTRUTURA FUNDIÁRIA E CONDIÇÃO DO PRODUTOR

Em 2017, Ipanguaçu/RN contabilizava 502 estabelecimentos agropecuários, ocupando uma área total de 18.909 hectares, o que resulta em uma área média de 37,7 ha por

estabelecimento. Quanto à condição do produtor em relação às terras (Tabela 1), predomina amplamente a propriedade: 16.158 ha (85,5% da área) estão sob produtores proprietários. Destaca-se, ainda, a presença de áreas sob concessionários ou assentados aguardando titulação (1.345 ha; 7,1%), indicativa da existência de projetos de assentamento no município, ao lado de arrendatários (715 ha; 3,8%) e comodatários (592 ha; 3,1%).

Tabela 1 – Condição do produtor em relação às terras. Ipanguaçu/RN, 2017

Condição do produtor em relação às terras	Área (ha)	%
Proprietário(a)	16.158	85,5
Concessionário(a)/assentado(a)	1.345	7,1
Arrendatário(a)	715	3,8
Comodatário(a) (inclusive TAUS)	592	3,1
Outras condições ¹	99	0,5
Total	18.909	100,0

Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es) com base em IBGE (2019).

¹ Inclui parceiros, ocupantes e produtores sem área, com células parcialmente desidentificadas.

A leitura da condição legal do produtor revela um traço menos usual para o interior semiárido. Embora a maior parte da área esteja sob produtores individuais (11.018 ha; 58,3%), uma fração expressiva — 5.940 ha, ou 31,4% da área — encontra-se sob sociedades anônimas ou por cotas de responsabilidade limitada, às quais se somam 1.281 ha (6,8%) sob condomínios, consórcios ou uniões de pessoas. O controle de quase 38% da área por pessoas jurídicas constitui assinatura clara da inserção empresarial associada à fruticultura irrigada, contrastando com o padrão de predomínio quase absoluto do produtor individual que caracteriza os municípios estritamente dedicados à agropecuária de sequeiro.

O controle de quase 38% da área de Ipanguaçu por pessoas jurídicas, destacado acima, não constitui dado fortuito: corresponde ao sedimento atual de um processo de territorialização do capital iniciado na década de 1980. A intensa aquisição de terras por empresas agrícolas a partir de 1982, com ápice em 1986, e a posterior consolidação da Del Monte, em 1993, ajudam a explicar a presença, ainda em 2017, de sociedades anônimas e por cotas de responsabilidade limitada controlando 5.940 hectares — 31,4% da área dos estabelecimentos agropecuários (Albano; Sá, 2008; Alves; Aquino; Silva Filho, 2018). A condição legal do produtor revelada pelo censo é, nesse sentido, a fotografia presente de uma estrutura fundiária empresarial cuja gênese histórica a literatura regional já documentara.

Em sentido complementar, os 1.345 hectares (7,1%) sob concessionários ou assentados aguardando titulação encontram respaldo nos registros do Incra: em 2017, Ipanguaçu abrigava dois projetos de assentamento, com 574 famílias e 16.728 hectares, o que correspondia a cerca de um quarto da área e a mais de um quarto das famílias assentadas em toda a microrregião do Vale do Açu (Aquino et al., 2023).

A diferença de magnitude entre as duas fontes — os 1.345 hectares do censo e os 16.728 hectares do Incra — decorre possivelmente de conceitos distintos: enquanto o censo capta a área dos estabelecimentos cujo produtor se declarou assentado ainda sem titulação definitiva, o dado do Incra refere-se ao perímetro total dos projetos criados; é provável, inclusive, que parte dos produtores hoje declarados proprietários corresponda a assentados já titulados. De todo modo, a reforma agrária, conforme argumentam Aquino et al. (2023), tem-se constituído em um dos pilares de resistência da agricultura familiar na região, contrabalançando parcialmente a concentração fundiária de feição empresarial.

3.2. USO E COBERTURA DAS TERRAS

A composição do uso das terras (Tabela 2 e Figura 1) sintetiza a dupla vocação do território. A maior parcela da área permanece sob cobertura natural: as matas e/ou florestas naturais somam 6.591 ha (34,9%) e, acrescidas das áreas destinadas à preservação permanente ou reserva legal (1.546 ha; 8,2%), perfazem 8.137 ha — 43,1% da área dos estabelecimentos recobertos por remanescentes de Caatinga. Em um bioma cuja área já se encontra extensamente desmatada em escala nacional, a manutenção de mais de dois quintos da área dos estabelecimentos agropecuários sob vegetação nativa reveste-se de inegável importância para a conservação.

Tabela 2 – Utilização das terras nos estabelecimentos agropecuários. Ipanguaçu/RN, 2017

Categoria de uso	Área (ha)	% da área total
Matas e/ou florestas naturais	6.591	34,9
Sistemas agroflorestais	3.136	16,6
Pastagens naturais	2.854	15,1
Lavouras permanentes	2.445	12,9
Matas naturais destinadas à APP/Reserva Legal	1.546	8,2
Lavouras temporárias	1.368	7,2
Outras utilizações ²	629	3,3
Pastagens plantadas (boas condições)	337	1,8

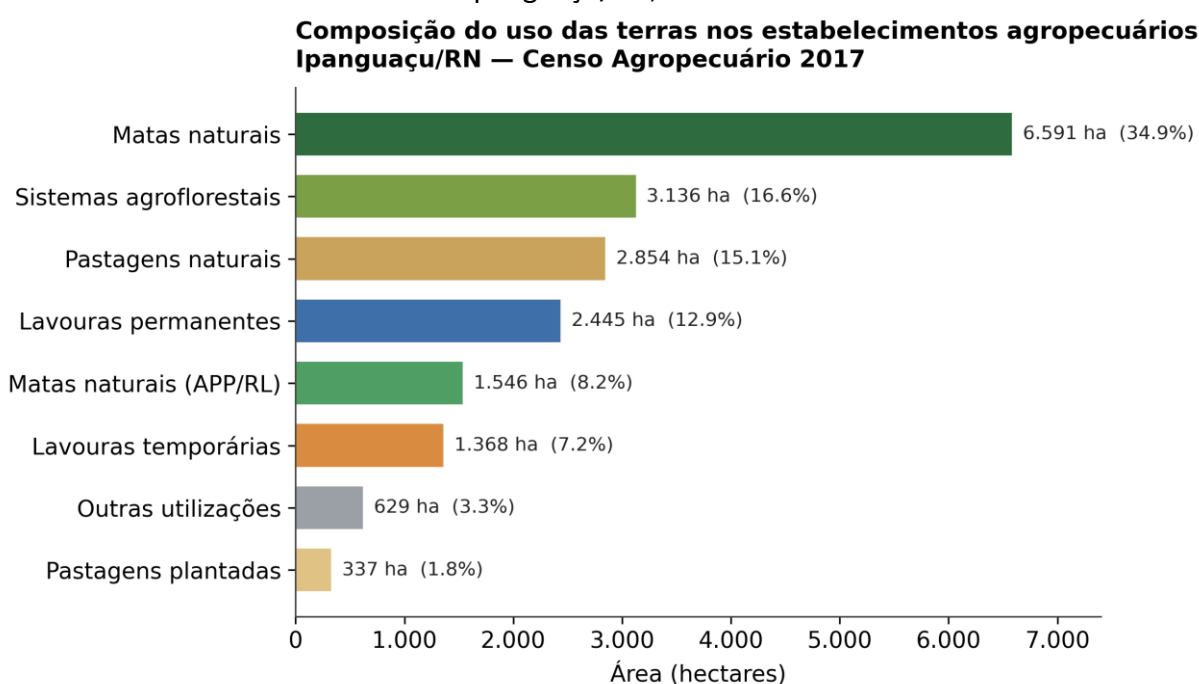
Categoria de uso	Área (ha)	% da área total
Área para cultivo de flores	3	0,0
Total	18.909	100,0

Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es) com base em IBGE (2019).

² Compreende tanques, açudes, construções, terras degradadas e inaproveitáveis, não detalhadas na base municipal.

Figura 1 – Composição do uso das terras nos estabelecimentos agropecuários.

Ipanguaçu/RN, 2017



Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es) com base em IBGE (2019).

As demais categorias distribuem-se entre os sistemas agroflorestais (3.136 ha; 16,6%), as pastagens naturais (2.854 ha; 15,1%), as lavouras permanentes (2.445 ha; 12,9%) e as lavouras temporárias (1.368 ha; 7,2%), restando às pastagens plantadas e ao cultivo de flores parcelas marginais. Sobre essa partição incide um indicador transversal decisivo: a área irrigada do município alcança 2.584 ha, equivalentes a 13,7% da área total dos estabelecimentos. Trata-se de proporção muito superior àquela observada no interior semiárido, onde a irrigação raramente ultrapassa poucos pontos percentuais, e está diretamente associada à fruticultura permanente sustentada pela disponibilidade hídrica do açude e do rio Açu. Daí decorre a principal tensão socioambiental do município: a convivência entre um uso intensivo de água em ambiente de déficit hídrico estrutural e a necessidade de preservar os remanescentes de Caatinga, sob pressão de conversão para lavouras e pastagens.

A elevada proporção de área irrigada (13,7%) e seu vínculo com a fruticultura permanente traduzem, em escala municipal, a substituição histórica das lavouras temporárias pelas permanentes documentada para o Vale do Açu. Com base na Produção Agrícola Municipal entre 1994 e 2014, Alves, Aquino e Silva Filho (2018) registram a retração das áreas de algodão, milho e melão e a ascensão da banana, da manga e do mamão irrigados, processo no qual a banana passou a responder, desde 1997, por mais da metade do valor da produção das lavouras permanentes da microrregião.

O predomínio das lavouras permanentes sobre as temporárias verificado em Ipanguaçu em 2017 (2.445 hectares contra 1.368 hectares) é, portanto, a expressão local de uma reconversão produtiva regional de longa duração. A essa reconversão associam-se tensões ambientais já assinaladas pela literatura — o uso disseminado de agroquímicos, que em 2006 alcançava 32% dos estabelecimentos familiares e 35% dos não familiares do Vale (Alves; Aquino; Silva Filho, 2018), e a pressão sobre a mata ciliar e os remanescentes de vegetação nativa. Sob essa ótica, a manutenção, em Ipanguaçu, de 43,1% da área dos estabelecimentos sob Caatinga preservada adquire valor de conservação ainda mais expressivo.

3.3. SISTEMAS PRODUTIVOS: A DUALIDADE ENTRE O IRRIGADO E O SEQUEIRO

É na comparação entre os sistemas produtivos que a dualidade do território se torna mais nítida. A lavoura permanente, irrigada e voltada à fruticultura, é dominada pela banana, que sozinha respondeu por 23.205 toneladas colhidas em 805 ha — rendimento da ordem de 29 t/ha, compatível com o cultivo irrigado e tecnificado — e por um valor de produção de aproximadamente R\$ 27,1 milhões. Seguem-se a manga (7.607 t em 600 ha; R\$ 6,1 milhões) e o mamão (2.383 t em 72 ha; R\$ 1,2 milhão), além de cultivos menores como o limão. No conjunto, a fruticultura permanente gera cerca de R\$ 34,5 milhões em valor de produção.

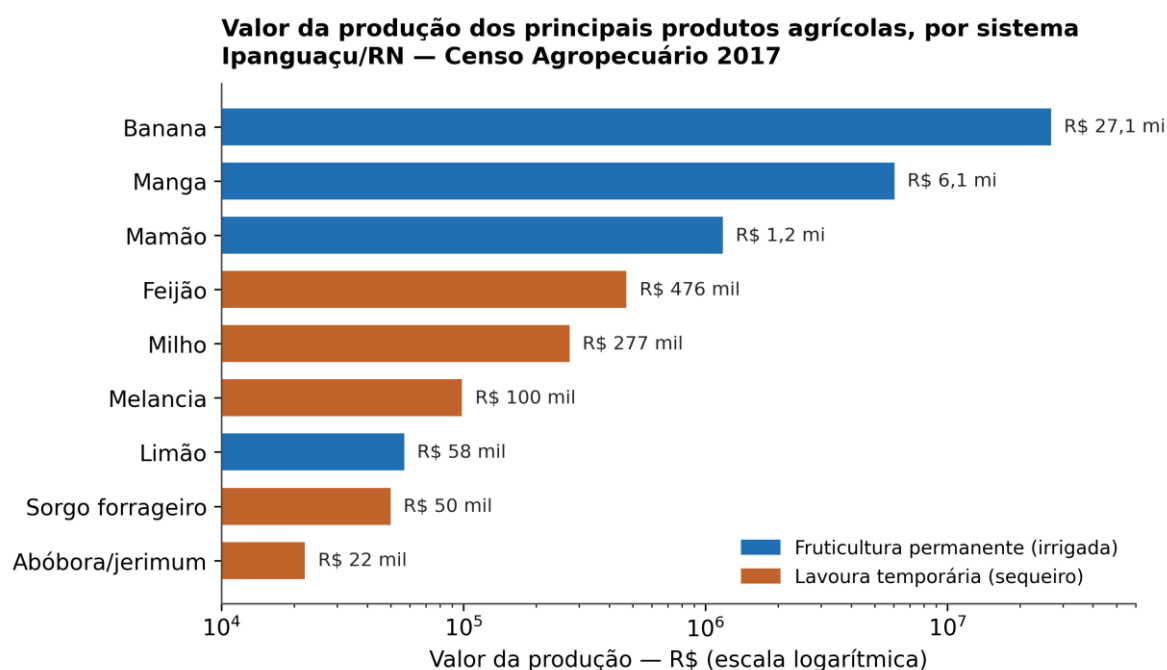
Desse modo, conforme observado, a concentração de cerca de R\$ 34,5 milhões do valor da produção na fruticultura permanente (dos quais aproximadamente R\$ 27,1 milhões apenas na banana) não somente confirma a dualidade do território, como expõe o município à vulnerabilidade própria das economias de monocultura. Albano e Sá (2008) e Alves, Aquino e Silva Filho (2018) advertem que a centralidade da banana e a dependência de uma única empresa de capital global tornam o território sensível às oscilações do mercado internacional e às decisões estratégicas da corporação. Essa fragilidade não é meramente hipotética: em

2008 e 2009, cheias do rio Piranhas-Açu destruíram parcelas importantes das lavouras de banana e, entre 2013 e 2015, a Del Monte reorientou sua estratégia de mercado e fechou fazendas na região (Alves; Aquino; Silva Filho, 2018).

A lavoura temporária, ao contrário, expressa a face de sequeiro e subsistência. Seu principal produto, o feijão — cultivado em suas variedades fradinho, verde e de cor, somou aproximadamente R\$ 476 mil em valor de produção, seguido pelo milho (R\$ 277 mil), pela melancia (R\$ 100 mil) e por cultivos forrageiros e a abóbora, todos com valores modestos. O somatório da lavoura temporária aproxima-se de apenas R\$ 0,95 milhão. A comparação é eloquente (Figura 2): a fruticultura permanente irrigada gera cerca de 36 vezes o valor da lavoura temporária de sequeiro, e a banana, isoladamente, supera em quase 28 vezes o valor de toda a produção temporária do município. Não se trata de diferença de grau, mas de dois circuitos econômicos distintos coabitando o mesmo território.

Igualmente importante, completa o quadro a pecuária, que permanece como esteio da base agropecuária familiar. O efetivo é liderado pelos ovinos (7.208 cabeças) e pelos bovinos (7.061), seguidos de caprinos (1.536), equinos (526), suínos (481), asininos (108) e muares (85). A presença simultânea e expressiva de ovinos e caprinos reafirma a vocação tradicional da ovino-caprinocultura semiárida, enquanto a bovinocultura assume também caráter leiteiro: foram registradas 1.400 vacas ordenhadas em 288 estabelecimentos produtores de leite. Esse conjunto — pequenos ruminantes, gado leiteiro e lavoura de sequeiro — constitui o sistema de produção da agropecuária familiar, complementar e socialmente distinto do circuito frutícola irrigado.

Figura 2 – Valor da produção dos principais produtos agrícolas, por sistema. Ipanguaçu/RN, 2017



Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es) com base em IBGE (2019). Eixo horizontal em escala logarítmica.

Desse modo, os dados de 2017, ao flagrarem a banana ainda como principal produto do município, devem ser lidos à luz dessa instabilidade conjuntural: o vigor do circuito frutícola convive com riscos estruturais que a fotografia censitária, isoladamente, não revela. No polo oposto, a pecuária e a lavoura de sequeiro (de valor modesto, mas socialmente capilarizadas) correspondem ao sistema da agricultura familiar que, na região, responde pela maior parte da produção de alimentos básicos e pela quase totalidade dos rebanhos (Aquino et al., 2023).

3.4. A ESTRUTURA DO TRABALHO COMO EVIDÊNCIA DA DUALIDADE

Se a estrutura fundiária e os sistemas produtivos sugerem a dualidade, a composição da força de trabalho a confirma de modo inequívoco. Em 2017, o município ocupava 2.451 pessoas em estabelecimentos agropecuários (Tabela 3). O dado decisivo é a predominância da mão de obra sem laço de parentesco com o produtor: 1.437 pessoas, ou 58,6% do total, das quais 858 eram empregados permanentes, 553 temporários e 26 parceiros(as). A força de trabalho com laço de parentesco — o trabalho familiar — somava 1.014 pessoas (41,4%), com acentuada masculinização (855 homens contra 159 mulheres).

Tabela 3 – Pessoal ocupado segundo o laço de parentesco com o produtor. Ipanguaçu/RN, 2017

Pessoal ocupado	Pessoas	%
Com laço de parentesco com o produtor	1.014	41,4
Masculino	855	34,9
Feminino	159	6,5
Sem laço de parentesco com o produtor	1.437	58,6
Empregados permanentes	858	35,0
Empregados temporários	553	22,6
Parceiros(as)	26	1,1
Total	2.451	100,0

Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es) com base em IBGE (2019).

O predomínio da mão de obra sem laço de parentesco (58,6%) é, em si, uma anomalia diante do padrão regional: no interior semiárido, a mão de obra familiar tende a prevalecer largamente, refletindo a agricultura familiar como forma social dominante. A inversão observada em Ipanguaçu — mais trabalhadores assalariados do que familiares — é precisamente a assinatura social do agronegócio frutícola. Essa leitura ganha densidade quando confrontada com as séries de emprego formal reunidas pela literatura: segundo dados da Relação Anual de Informações Sociais analisados por Alves, Aquino e Silva Filho (2018), o número de empregados no setor agropecuário do município passou de 1.223, em 2002, para apenas 663, em 2014 — retração drástica associada à reestruturação da Del Monte. Ainda assim, é o trabalho assalariado que organiza a força de trabalho local, e em condições socialmente precárias: em 2014, 95,45% dos assalariados agrícolas de Ipanguaçu percebiam entre zero e dois salários-mínimos (Alves; Aquino; Silva Filho, 2018).

No outro polo, a força de trabalho familiar — 41,4% do total, com acentuada masculinização (855 homens contra 159 mulheres) — reproduz o perfil regional descrito por Aquino et al. (2023) para o Vale do Açu, caracterizado por envelhecimento dos responsáveis, baixa escolaridade e forte dependência de receitas externas, sobretudo aposentadorias e pensões e o Programa Bolsa Família, do qual dependia, em 2014, 54% da população rural da microrregião (Alves; Aquino; Silva Filho, 2018). O censo, ao quantificar a coexistência de força de trabalho familiar nos estabelecimentos de sequeiro e de assalariamento nas fazendas de fruta, oferece a face social da dualidade que perpassa toda a estrutura agrária local — uma

dualidade, registre-se, duplamente desfavorável ao trabalhador: de um lado, assalariamento precário e sujeito às flutuações da demanda empresarial; de outro, agricultura familiar que apenas se reproduz com o aporte de transferências sociais.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados do Censo Agropecuário 2017 permitem caracterizar Ipanguaçu como um retrato condensado de um semiárido heterogêneo. Mais do que o sertão da seca e da subsistência, o município revela-se um território de modernização agrícola irrigada, com inserção em mercados distantes, sobreposta a uma base agropecuária familiar de sequeiro. A estrutura fundiária (quase 38% da área sob pessoas jurídicas), o uso da terra (13,7% de área irrigada convivendo com 43% de remanescentes de Caatinga), os sistemas produtivos (a fruticultura permanente gerando cerca de 36 vezes o valor da lavoura temporária) e a força de trabalho, majoritariamente assalariada, convergem para um diagnóstico de dualidade.

Essa dualidade não é socioambientalmente neutra. O uso intensivo de água em região de déficit hídrico estrutural torna o sistema dependente da regularização da Barragem Armando Ribeiro Gonçalves e mantém sob pressão os remanescentes de Caatinga, ao passo que a concentração fundiária empresarial e o assalariamento configuram inserções econômicas bastante desiguais. Convém, contudo, matizar a leitura da vulnerabilidade: se o circuito frutícola está exposto às oscilações do mercado, a base familiar de sequeiro tem demonstrado ainda certa resistência diante da adversidade climática. Mesmo sob a severa estiagem de 2012–2017 (Souza; Aquino, 2018), apenas cerca de 1,8% dos estabelecimentos potiguares declararam ausência de produção (Aquino et al., 2020); essa resiliência, ancorada na diversificação produtiva e em tecnologias sociais de convivência — como as cisternas, presentes em cerca de dois terços dos estabelecimentos familiares —, sugere que fortalecer a agricultura familiar é, a um só tempo, imperativo de justiça social e estratégia de segurança alimentar frente às incertezas climáticas.

À luz da literatura sobre o Vale do Açu, Ipanguaçu confirma-se como caso emblemático de uma “ilha de modernização agrícola” (Araújo, 2000 *apud* Alves; Aquino; Silva Filho, 2018) que é, simultaneamente, um “espaço agrícola de exclusão” (Elias, 2006 *apud* Alves; Aquino; Silva Filho, 2018). A dualidade flagrada pelo Censo não é traço idiossincrático do município, mas a estruturação local de um processo histórico de modernização seletiva induzido pelo

Estado e capitaneado pelo capital desde os anos 1980 (Albano; Sá, 2008): o censo oferece a fotografia estrutural; a literatura regional, o filme do processo que a produziu.

A articulação entre ambos aponta a necessidade de políticas que simultaneamente qualifiquem o trabalho no circuito frutícola e fortaleçam a agricultura familiar de sequeiro — orientação tanto mais urgente quanto, a partir de 2016, a extinção do Ministério do Desenvolvimento Agrário e o enfraquecimento do PRONAF reduziram a capacidade estatal de apoio justamente ao segmento que, no semiárido, mais depende de políticas públicas para a sua reprodução (Mattei, 2018).

Reconhecem-se, por fim, as limitações do recorte. Por basear-se em um único levantamento, a análise é transversal e não capta a trajetória das transformações; recomenda-se, em estudos futuros, a integração com técnicas de sensoriamento remoto, capazes de monitorar a expansão da área irrigada e a dinâmica da cobertura vegetal nativa. Ainda assim, o Censo Agropecuário confirma-se como fonte de notável potência para a geografia agrária regional, oferecendo, mesmo em uma fotografia de um só instante, um diagnóstico estrutural da complexidade que se esconde sob o rótulo aparentemente homogêneo do semiárido.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, Aziz Nacib. *Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas*. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.
- ALBANO, Gleydson Pinheiro; SÁ, Alcindo José de. Políticas públicas e globalização da agricultura no Vale do Açu-RN. *Revista de Geografia*, Recife, v. 25, n. 2, p. 58-80, maio/ago. 2008.
- ALVES, Vicente Eudes Lemos; AQUINO, Joacir Rufino de; SILVA FILHO, Raimundo Inácio da. A modernização da fruticultura irrigada e seus impactos socioeconômicos e ambientais no Vale do Açu/RN. *Revista GeoInterações*, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 35-56, 2018. DOI: 10.59776/2526-3889.2018.1093.
- AQUINO, Joacir Rufino de; ARAÚJO, Ionara Jane de; NUNES, Emanoela Carneiro; LACERDA, Marta Aurélia Dantas de. Agricultura familiar no Vale do Açu (RN): uma caracterização a partir do Censo Agropecuário 2017. *Revista GeoInterações*, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 36-55, 2023. DOI: 10.59776/2526-3889.2023.4977.
- AQUINO, Joacir Rufino de; SILVA, Roberto Marinho da; NUNES, Emanuel Márcio; COSTA, Fernando Bastos; ALBUQUERQUE, Willy Farias. Agricultura familiar no Rio Grande do Norte segundo o Censo Agropecuário 2017: perfil e desafios para o desenvolvimento rural. *Revista Econômica do Nordeste*, [S. l.], v. 51, suplemento especial, p. 113-131, 2020. DOI: 10.61673/ren.2020.1270.

- FERNANDES, Ana Amélia. Autoritarismo e resistência no Baixo-Açu. Natal, RN: UFRN/CCHLA, 1992. 136 p.
- FERNANDES, Bernardo Mançano; WELCH, Clifford Andrew; GONÇALVES, Elienai Constantino. Políticas fundiárias no Brasil: uma análise geo-histórica da governança da terra no Brasil. *Governança da terra no século XXI: Framing the Debate Series*, n. 2. Roma: International Land Coalition, 2012. 61 p.
- IBGE — INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo agropecuário: resultados definitivos 2017. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.
- IBGE — INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Sistema IBGE de Recuperação Automática — SIDRA: Censo Agropecuário 2017 — resultados definitivos. Rio de Janeiro: IBGE, [s. d.]. Acesso em: 28 jun. 2026.
- MATTEI, Lauro. A política agrária e os retrocessos do governo Temer. *OKARA: Geografia em Debate*, João Pessoa, v. 12, n. 2, p. 293-307, 2018. DOI: 10.22478/ufpb.1982-3878.2018v12n2.41318.
- MITIDIERO JUNIOR, Marco Antonio; BARBOSA, Humberto Junior Neves; SÁ, Thiago Hérick de. Quem produz comida para os brasileiros? 10 anos do Censo Agropecuário 2006. *Pegada: A Revista da Geografia do Trabalho*, [S. l.], v. 18, n. 3, p. 7-77, set./dez. 2017. DOI: 10.33026/peg.v18i3.5540.
- SANTOS, Jovelina Silva. A desordem do progresso: o Projeto Baixo-Açu e a expropriação das terras camponesas de trabalho e moradia. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE HISTÓRIA, 30., 2019, Recife. *Anais [...]*. Recife: ANPUH, 2019. p. 1-17.
- SOUZA, Érika Miranda de; AQUINO, Joacir Rufino de. A Grande Seca e seus efeitos na produção agropecuária do Rio Grande do Norte: 2012-2016. *Revista GeoNordeste*, São Cristóvão, ano XXIX, n. 2, p. 174-195, jul./dez. 2018.
- SUDENE — SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE. Conselho Deliberativo. Resolução CONDEL/SUDENE nº 176, de 3 de janeiro de 2024. Aprova Relatório Conclusivo elaborado pela Equipe Técnica do Comitê Provisório do Conselho Deliberativo da SUDENE, instituído pela Resolução CONDEL/SUDENE nº 155, de 29 de abril de 2022, sobre as irresignações apresentadas por entes federativos subnacionais contra a exclusão de municípios do Semiárido brasileiro e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, edição 5, p. 946, 8 jan. 2024.
- VALADARES, Alexandre Arbex; ALVES, Fábio. A redução do número de estabelecimentos familiares e do pessoal ocupado na agricultura familiar: hipóteses à luz da análise dos Censos Agropecuários 2006 e 2017. *Mercado de Trabalho: conjuntura e análise*, Brasília, n. 70, p. 31-48, set. 2020. DOI: 10.38116/bmt70/nta1.

CAPÍTULO II

DESAFIOS SOCIOAMBIENTAIS NA DISTRIBUIÇÃO EQUITATIVA DE CRÉDITO RURAL NO BRASIL E NA AMAZÔNIA

SOCIO-ENVIRONMENTAL CHALLENGES TO THE EQUITABLE DISTRIBUTION OF RURAL CREDIT IN BRAZIL AND THE AMAZON REGION

DOI: 10.51859/ampla.mac6200-2

Joathan Cipriano Castro ¹

Hanna Ferreira de Souza ²

Marcos Simehonne Castro do Nascimento ²

Ricardo Christian Lobato Machado ³

João Manoel Pinheiro Santos ⁴

Julia Isabella de Matos Rodrigues ⁶

Walmer Bruno Rocha Martins ⁷

¹Mestrado em andamento em Ciências Ambientais no Programa de Pós-graduação em Uso Sustentável dos Recursos Naturais em Regiões Tropicais, Instituto Tecnológico Vale – ITV

²Mestrado em andamento no Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

³Doutorado em andamento no Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

⁴Graduando em Engenharia Florestal, Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

⁶Doutorado em Ciências Florestais, Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

⁷Professor do Campus Capitão Poço da Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

RESUMO

A agricultura familiar é fundamental para a segurança alimentar brasileira, representando a maioria dos estabelecimentos rurais, porém enfrenta desafios históricos de acesso ao crédito e infraestrutura. Como estratégia de inclusão, criou-se o Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF), porém sua efetividade é limitada por desafios como burocracia, irregularidade fundiária e insuficiência de assistência técnica. No estado do Pará, apesar da predominância da agricultura familiar em número de propriedades, persistem obstáculos estruturais relacionados à precariedade logística e à concentração de terras em grandes propriedades voltadas à produção de *commodities*. Um dos importantes avanços na concessão de crédito rural foi a subordinação a condicionantes socioambientais, como o Cadastro Ambiental Rural (CAR) e a proibição de financiamento a áreas desmatadas ou com trabalho análogo à escravidão. Embora necessárias, essas exigências geram

dificuldades para pequenos produtores devido a problemas nos sistemas de monitoramento e à complexidade documental. Além disso, a concentração de recursos do PRONAF na produção de *commodities* como soja e pecuária, tanto no Brasil quanto no Pará, contraria o objetivo de garantir segurança alimentar e atrasa a transição para uma agricultura agroecológica. A distribuição do crédito também é desigual entre as regiões brasileiras, com Nordeste e Norte recebendo valores médios muito inferiores aos do Centro-Oeste e Sudeste. Agricultores mais vulneráveis socioeconomicamente são os mais excluídos do financiamento, evidenciando desigualdades históricas tanto socioeconômicas, quanto regionais. Conclui-se que superar esses desafios exige melhorias no sistema de acesso ao crédito e fortalecimento de linhas voltadas para práticas sustentáveis.

Palavras-chave: Agricultura familiar. PRONAF. Amazônia. Regularização ambiental.

ABSTRACT

Family farming is fundamental to Brazilian food security, representing the majority of rural establishments, yet it faces historical challenges regarding access to credit and infrastructure. As an inclusion strategy, the National Program for Strengthening Family Farming (PRONAF) was created, but its effectiveness is limited by challenges such as bureaucracy, land tenure irregularity, and insufficient technical assistance. In the state of Pará, despite the predominance of family farming in terms of number of properties, structural obstacles persist related to logistical precariousness and land concentration in large properties focused on commodity production. One important advancement in rural credit concession was its subordination to socio-environmental conditions, such as the Rural Environmental Registry (CAR) and the prohibition of financing for deforested areas or those involving slave-like labor.

Although necessary, these requirements create difficulties for smallholders due to monitoring system flaws and document complexity. Furthermore, the concentration of PRONAF resources in commodity production such as soybeans and livestock, both in Brazil and in Pará, contradicts the goal of ensuring food security and delays the transition to agroecological agriculture. Credit distribution is also unequal among Brazilian regions, with the Northeast and North receiving average values much lower than those of the Midwest and Southeast. Socioeconomically vulnerable farmers are the most excluded from financing, evidencing historical inequalities both socioeconomic and regional. We conclude that overcoming these challenges requires improvements in the credit access system and strengthening of credit lines focused on sustainable practices.

Keywords: Family farming. PRONAF. Amazon. Environmental regularization.

1. INTRODUÇÃO

A agricultura familiar é caracterizada pela posse dos meios de produção e responsabilidade pela gestão e organização do estabelecimento pela unidade familiar (Wanderley, 2009), consolidada pela lei nº 11.326/2006, a qual definiu as bases da Política Nacional da Agricultura Familiar. Em 2017, aproximadamente 77% de dos estabelecimentos rurais brasileiros eram de agricultores familiares, sendo responsáveis por 22% do valor da produção agropecuária do país (Silveira, Montenegro e Pereira, 2024). Esses números demonstram a relevância da agricultura familiar para a segurança e a soberania alimentar brasileira, tendo forte participação no mercado interno.

Apesar da importante participação da agricultura familiar, produtores ainda enfrentam desafios ligados ao acesso ao crédito e infraestrutura adequada, o que compromete a renda e dificulta a permanência, principalmente da juventude, no meio rural (Oliveira, Mendes e Vasconcelos, 2021). Esses empecilhos decorrem de processos históricos de desenvolvimento desigual da agricultura brasileira, principalmente entre as décadas de 50 e 70, período no qual as primeiras linhas de crédito rural foram criadas, possibilitando ganhos de produtividade principalmente de grandes produtores, enquanto agricultores de menor renda tiveram menos acesso a esses subsídios (Fossá, Matte e Mattei, 2022).

Como estratégia para reduzir desigualdades, garantir infraestrutura e permanência de agricultores familiares no campo, criaram-se programas e linhas de crédito específicos para a Agricultura Familiar, como o Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF) pelo decreto nº 1.946, de 28 de junho de 1996. No cenário atual houve a diversificação das linhas de crédito, porém reduziram-se o número de contratos, o que pode indicar dificuldades de acesso ao crédito por pequenos produtores, relacionado a dificuldades relacionadas a documentação (Schinatto e Carrara, 2021).

O objetivo do presente trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica narrativa sobre a trajetória da agricultura familiar no Brasil e no Estado do Pará, bem como evidenciar, com base na literatura científica, os principais desafios no acesso ao crédito por pequenos agricultores familiares.

2. AGRICULTURA FAMILIAR NO BRASIL E NO PARÁ

A consolidação do conceito de agricultura familiar no Brasil, especialmente a partir da década de 1990, resultou de processos simultâneos de mobilização social, produção acadêmica e formulação de políticas públicas, que passaram a reconhecer esse segmento como fundamental para a segurança alimentar, a geração de renda e a ocupação equilibrada do território rural (Bacelar; Favareto, 2020; Silva, 2012). Esse reconhecimento foi acompanhado pela definição de critérios legais que delimitam a Unidade Familiar de Produção Agrária, considerando dimensão de área, predominância do trabalho familiar, origem da renda e gestão do estabelecimento, elementos que reforçam a especificidade socioeconômica desse segmento no espaço rural brasileiro (BACEN, 2021).

As projeções de expansão da área cultivada e da participação da agricultura familiar na produção de alimentos reforçam sua centralidade estratégica para a segurança alimentar e nutricional do país, bem como para a ocupação sustentável do território rural brasileiro (Lima; Silva; Iwata, 2019). Conforme destaca Schneider (2016), a produção de alimentos para o mercado interno continua sendo fortemente dependente da agricultura familiar, o que evidencia sua dimensão estratégica para a soberania e a segurança alimentar nacionais. Assim, fortalecer a agricultura familiar significa não apenas ampliar a produção agrícola, mas também promover justiça social, equilíbrio territorial e conservação ambiental, fundamentos indispensáveis para um modelo de desenvolvimento rural verdadeiramente sustentável (Bacelar; Favareto, 2020).

A agricultura familiar caracteriza-se pela forte vinculação entre família, trabalho e território, combinando produção para autoconsumo com inserção em mercados locais e regionais, frequentemente sustentada por diversidade de atividades econômicas. A elevada diversidade produtiva, frequentemente baseada em policultivos, sistemas agroflorestais, criação de pequenos animais e uso de recursos naturais locais, contribui para a resiliência socioeconômica das famílias rurais e para a manutenção de práticas culturais e ambientais associadas ao uso sustentável dos recursos naturais (Siliprandi; Cintrão, 2011; Silva, 2012). Ademais, a diversificação da produção familiar confere capacidade de adaptação a contextos adversos, especialmente em cenários de instabilidade econômica e mudanças ambientais, reforçando sua centralidade para a segurança alimentar no Brasil.

Apesar de sua diversidade e resiliência, o desenvolvimento territorial da agricultura familiar depende fortemente de fatores estruturais, como infraestrutura rural, acesso a mercados, organização coletiva e inclusão digital. Nesse sentido, a incorporação de tecnologias digitais e práticas sustentáveis amplia a eficiência produtiva e favorece modelos de produção compatíveis com a conservação ambiental e a mitigação das mudanças climáticas (Etges; Carissimi, 2014; Abramovay, 2000). Além disso, Investimentos em estradas, eletrificação, conectividade e sistemas produtivos locais também podem ampliar a competitividade dos agricultores e reduzir custos logísticos, enquanto cooperativas e associações fortalecem a capacidade de negociação, a comercialização e o acesso a políticas públicas e crédito (Alencar; Lunas; Cardoso Junior, 2019; Siliprandi; Cintrão, 2011).

Nesse cenário, políticas públicas voltadas à agricultura familiar, com destaque para o Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF), desempenham papel decisivo ao promover inclusão produtiva, investimento tecnológico e diversificação de renda (Gazolla; Schneider, 2013; Silva, 2012). Contudo, a efetividade dessas políticas depende de governança participativa, capacitação contínua dos agricultores e articulação institucional em múltiplas escalas territoriais, incluindo cooperação internacional e planejamento de longo prazo (Delgado; Leite, 2011; Brandão, 2008).

Schneider e Tartaruga (2004) ressaltam que a agricultura familiar deve ser compreendida como uma forma social de produção que articula dimensões econômicas, sociais, culturais e ambientais, superando interpretações que a associam exclusivamente ao atraso tecnológico. No Brasil, esse segmento responde por parcela significativa da produção de alimentos básicos consumidos internamente, como mandioca, feijão, milho, hortaliças e

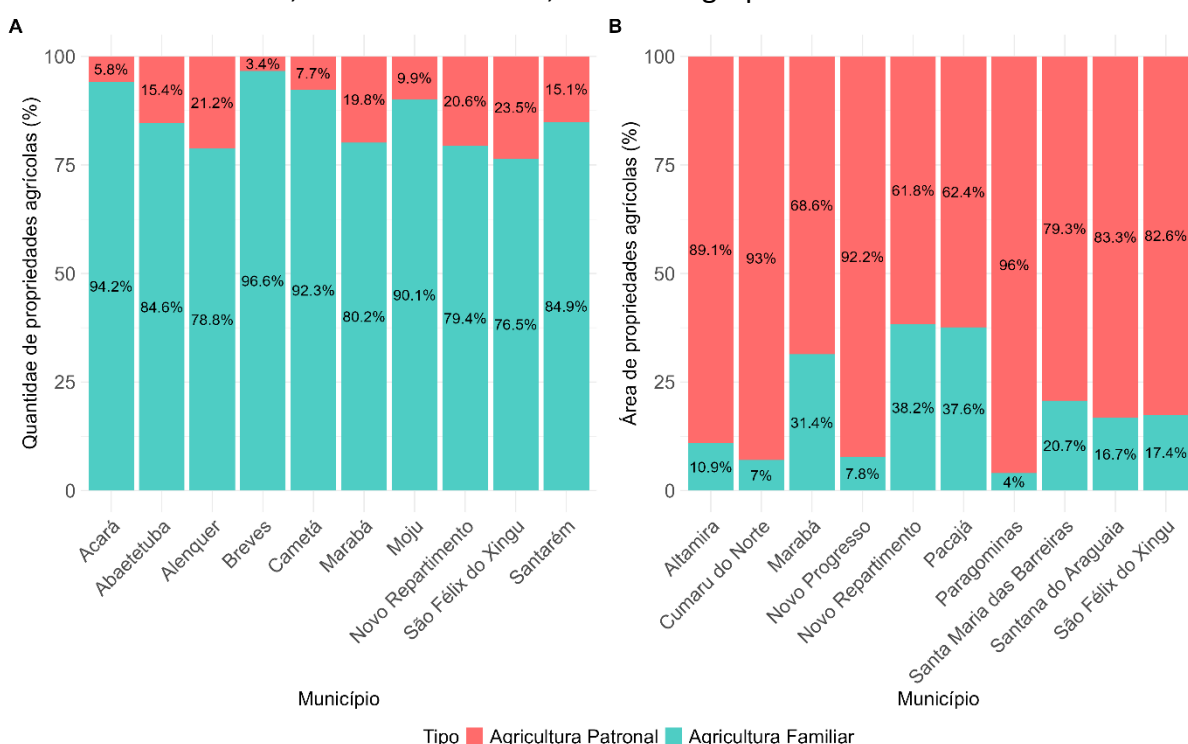
leite, desempenhando função decisiva no abastecimento alimentar (Corrêa, Filgueiras e Cativo, 2024).

A compreensão contemporânea da agricultura familiar exige abordagem territorial do desenvolvimento rural, reconhecendo o território como espaço de vida, identidade e construção histórica. Abramovay (1998) argumenta que o desenvolvimento rural deve ser entendido como processo que envolve valorização dos recursos locais, diversificação econômica e participação social, superando visões restritas ao aumento da produção agrícola. No contexto amazônico, essa perspectiva é particularmente relevante, pois sistemas produtivos familiares frequentemente mantêm cobertura vegetal, diversidade de espécies e práticas compatíveis com a conservação ambiental (Pauletto *et al.*, 2025). Nascimento e Correa (2024) destacam que tais sistemas representam alternativas concretas ao desmatamento predatório, conciliando uso econômico da terra e preservação da biodiversidade.

No estado do Pará, a relevância da agricultura familiar assume contornos ainda mais complexos devido às especificidades ecológicas e históricas da Amazônia. Os sistemas produtivos combinam cultivos agrícolas tradicionais, manejo de espécies florestais e atividades extrativistas baseadas em produtos não madeireiros, configurando arranjos híbridos que articulam agricultura, floresta e mercado regional (Oliveira *et al.*, 2025; Vasconcelos *et al.*, 2022; Quadros *et al.*, 2023). Tais práticas contribuem para a conservação da biodiversidade e para a manutenção de serviços ecossistêmicos, ao mesmo tempo em que garantem subsistência e geração de renda.

Segundo dados do censo agropecuário de 2017, todos os 10 municípios com maior quantidade de estabelecimentos agrícolas apresentaram mais de 70% das propriedades categorizadas como de agricultura familiar. Inversamente, nos 10 municípios com maior área agrícola, a agricultura familiar não passa de 38,2% da área total (Figura 1), o que reflete a concentração de terra agrícola em grandes propriedades rurais, as quais produzem majoritariamente a agricultura de commodities. Apesar do grande número de estabelecimentos de agricultura familiar no Pará, persistem desafios estruturais relacionados à precariedade de infraestrutura, limitações de assistência técnica, dificuldades logísticas e acesso restrito a mercados e políticas públicas, fatores que reforçam desigualdades regionais históricas e condicionam o desenvolvimento das famílias rurais amazônicas (Paula Filho, Calvi e Castro, 2016).

Figura 1 – Percentual de propriedades agrícolas familiares e patronais nos 10 municípios com maior quantidade de estabelecimentos (A) e Percentual de área de propriedades agrícolas familiares e patronais nos 10 municípios com maior área agrícola (B) no estado do Pará, Amazônia Oriental, no censo agropecuário de 2017



Fonte: Autores, 2026

3. CRÉDITO RURAL COMO POLÍTICA PÚBLICA DE DESENVOLVIMENTO

O crédito rural configura-se como um dos principais instrumentos de intervenção estatal na agricultura brasileira, sendo destinado ao financiamento da produção, à incorporação de tecnologias, ao estímulo a investimentos e à estabilização da oferta de alimentos (Nogueira *et al.*, 2023). Sua relevância decorre do fato de que a atividade agrícola apresenta ciclos produtivos longos, elevada exposição a riscos climáticos e forte dependência de capital antecipado (Shah, Hellegers e Siderius, 2021; Vilani *et al.*, 2024).

Delgado (2012) destaca que o crédito rural constitui mecanismo capaz de viabilizar a produção econômica da agricultura e induzir transformações produtivas, exercendo influência direta sobre padrões tecnológicos e organização do trabalho no campo. Para a agricultura familiar, o acesso ao financiamento assume dimensão ainda mais significativa, pois reduz restrições históricas de capital e amplia possibilidades de investimento produtivo, diversificação de atividades e melhoria das condições de vida. Nesse contexto, o Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar consolidou-se como marco institucional

das políticas públicas rurais brasileiras ao estabelecer linhas específicas de financiamento com juros subsidiados e condições adequadas à realidade dos pequenos produtores. Aquino e Schneider (2015) afirmam que o programa representa um marco na institucionalização das políticas públicas voltadas à agricultura familiar no Brasil, reconhecendo oficialmente esse segmento como sujeito de direitos.

Estudos indicam impactos positivos sobre renda, modernização produtiva e permanência das famílias no meio rural, especialmente quando o crédito é articulado à assistência técnica e ao acesso a mercados (Jimi *et al.*, 2019; Kipkogei *et al.*, 2025; Vitorino, Ervati e Gomes, 2025). Aquino e Schneider (2016) observam que tais políticas contribuem para processos de inclusão produtiva, embora persistam desigualdades regionais que limitam o alcance do financiamento em áreas periféricas, como parte significativa da Amazônia. Paralelamente, o crédito rural passou a incorporar dimensões socioambientais e territoriais, incluindo linhas voltadas à agroecologia, recuperação de áreas degradadas e sistemas produtivos sustentáveis. Godoi; Búrigo e Cazella (2016) argumentam que essa transformação reflete a necessidade de políticas capazes de conciliar produção e conservação, uma vez que o desenvolvimento rural sustentável depende da integração entre eficiência econômica, justiça social e preservação ambiental. Assim, o crédito rural assume função estratégica não apenas para aumento da produtividade, mas também para construção de modelos sustentáveis de uso da terra, essenciais no contexto amazônico.

4. CONFORMIDADE SOCIOAMBIENTAL E ACESSO AO CRÉDITO RURAL

Ao longo do tempo, o acesso ao crédito rural passou a ser subordinado ao atendimento das leis ambientais e da regularização fundiária, principalmente após a criação do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm), a partir do qual embargos de áreas desmatadas e com irregularidades no Cadastro Ambiental Rural (CAR), bem como redução de acesso a mercados e linhas de crédito, foram intensificados (West e Fearnside, 2021). Nesse mesmo sentido, a Nº 5.268, DE 18 DE DEZEMBRO DE 2025 do Banco Central do Brasil proibiram a concessão de crédito a proprietários que mantiveram trabalhadores em situação análoga a escravidão, bem como propriedades que estejam sobrepostas a territórios de comunidades remanescentes de quilombos. Esses impedimentos são fundamentais ao desmantelamento de práticas ambientais e sociais ilegais no meio rural,

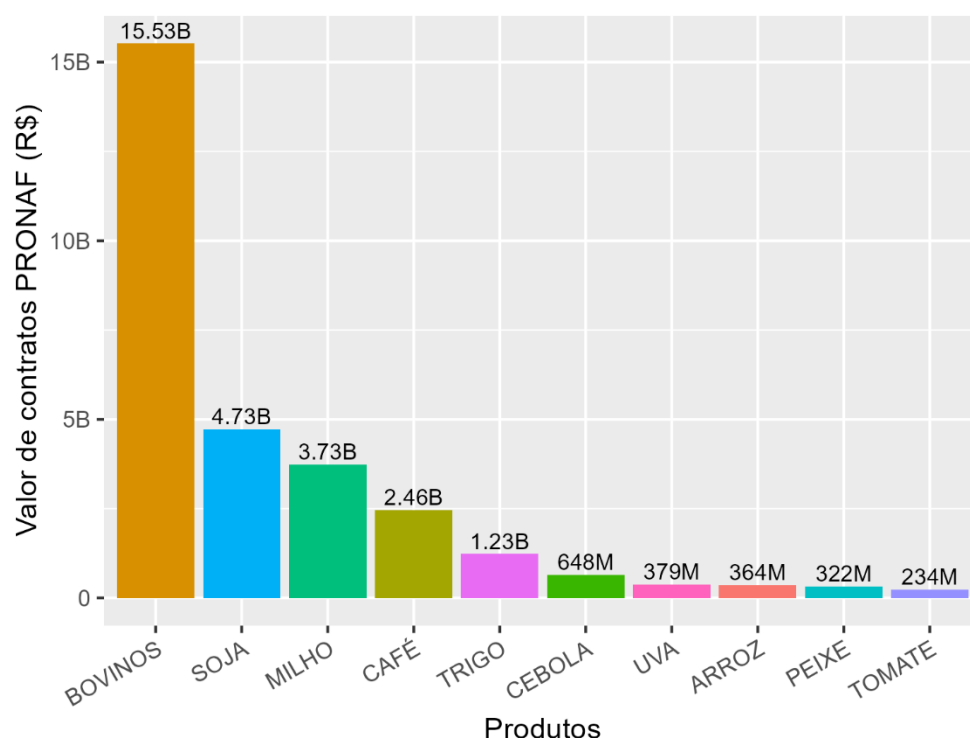
promovendo a conservação da vegetação nativa e a proteção de povos e comunidades tradicionais e seus territórios.

No entanto, avanços ainda são necessários na implementação desses mecanismos. Nesse contexto, Gerentes de crédito de instituições financeiras percebem limitações no sistema de análise dos parâmetros ambientais da concessão de crédito, ocorrendo erros de sinalização de supressões autorizadas como desmatamento ilegal devido às limitações do MAPBIOMAS, além da dificuldade de apresentação da documentação adequada por pequenos produtores, o que pode levar a perda da janela de plantio (Alves, Vieira Filho e Branco, 2025). Além disso, outra limitação é o aumento do desmatamento seguido do aumento do crédito rural em determinados contextos. Quando destinado à pecuária, Ruggiero, Pereda e Pfaff (2026) encontraram aumento do desmatamento em áreas onde a pastagem se expande para florestas. Já em concessões de crédito para culturas agrícolas, os autores encontraram aumento do desmatamento em áreas onde a expansão ocorre para áreas de pasto e fragmentos florestais.

De forma contrária, Assunção et al. (2020) encontraram redução do desmatamento aliada a concessão de crédito rural, principalmente em municípios com maior expressividade da pecuária de corte na economia. Além disso, outro estudo indicou uma relação negativa entre concessão de crédito e desmatamento na Amazônia (Faria *et al.*, 2025). Esses achados indicam que, apesar da necessidade de avanços, subordinar a concessão de crédito ao atendimento de normas socioambientais é uma importante estratégia para a promoção de uma agropecuária sustentável no Brasil.

Apesar das condicionantes ambientais, existem também limitações relacionadas a sustentabilidade na distribuição de crédito dentro do Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF). Nessa perspectiva, críticas ao PRONAF são direcionadas a maior concentração de recursos para a produção de *commodities*, como soja e pecuária para exportação (Figura 2) (Fossá, Villwock e Matte, 2026). Essa realidade impede que o objetivo do programa, ou seja, a garantia da segurança alimentar, seja plenamente alcançado, uma vez que são priorizadas culturas que em sua maioria não abastecem o mercado interno (Lopes Silva *et al.*, 2023).

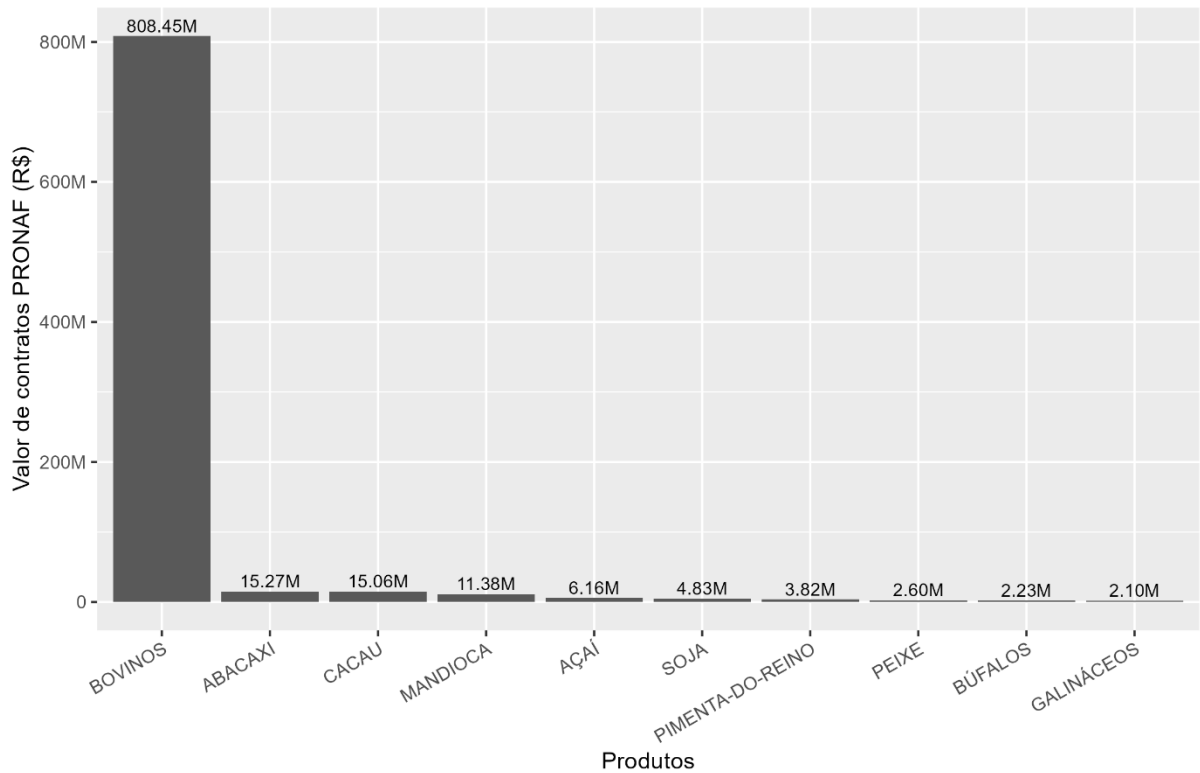
Figura 2 – Distribuição do valor dos contratos do PRONAF por produto, dados do Banco Central para 2025.



Fonte: Os Autores

A realidade nacional também se repete no estado do Pará, onde o financiamento para bovinos é muito maior do que para outros produtos (Figura 3). Esse cenário se mostrou presente mesmo em linhas de crédito regionais específicas, como programa Amazônia Sustentável, no qual, entre 2017 e 2023, boa parte dos recursos foi utilizado para produção de soja, cana-de-açúcar e equipamentos para produção de *commodities* (Gumiero, 2025). Além disso, a concentração de recursos em regiões mais desenvolvidas, como Sul e Sudeste, também revelam a deficiência da distribuição equitativa dos recursos do programa, o que tende a perpetuar disparidades regionais históricas no território brasileiro (Tabela 1).

Figura 3 – Distribuição de recursos do PRONAF por tipo de produto no estado do Pará em 2025.



Fonte: Banco Central (2025)

Tabela 1 – Distribuição dos recursos do PRONAF entre as macrorregiões brasileiras.

Região	Quantidade de Contratos	Valor Contratado (R\$)	Valor Médio (R\$)
CENTRO-OESTE	119,104	83,484,141,728.10	700,934.83
SUDESTE	371,602	95,902,465,381.52	258,078.44
NORTE	122,722	27,410,430,676.91	223,353.85
SUL	553,878	113,882,040,622.91	205,608.53
NORDESTE	1,284,194	38,788,406,279.96	30,204.48
Total	2,451,500	359,467,484,689.40	146,631.65

Fonte: Banco Central, 2025

5. BARREIRAS NO ACESSO AO CRÉDITO

Apesar de sua relevância, o crédito rural ainda enfrenta obstáculos significativos relacionados tanto ao acesso quanto à gestão dos recursos pelos agricultores familiares. Entre os principais entraves destacam-se burocracia documental, exigência de garantias reais, irregularidade fundiária e oferta insuficiente de assistência técnica qualificada, fatores que

tendem a excluir produtores em situação de maior vulnerabilidade social (Moreira-Dantas *et al.*, 2023). Aquino e Schneider (2016) ressaltam que tais limitações restringem o alcance das políticas públicas justamente entre os agricultores mais pobres, reduzindo seu potencial redistributivo. Além disso, a baixa escolaridade formal e a limitada capacitação em gestão financeira dificultam o planejamento produtivo e a aplicação eficiente dos recursos obtidos, comprometendo resultados econômicos esperados.

Outro elemento relevante refere-se à fragilidade organizacional de parte dos agricultores familiares, marcada pela baixa participação em cooperativas e associações. Essa condição reduz o poder de negociação, dificulta o acesso coletivo a mercados e limita economias de escala. Godoi, Búrigo e Cazella (2016) enfatizam que organizações sociais rurais desempenham papel decisivo na mediação entre políticas públicas e agricultores, ampliando impactos socioeconômicos positivos. Na Amazônia, esses desafios são intensificados por grandes distâncias geográficas, baixa presença de serviços financeiros e dificuldades logísticas, exigindo estratégias integradas que articulem crédito, regularização fundiária, assistência técnica e fortalecimento organizacional (Moreira-Dantas *et al.*, 2023).

Além dessas barreiras operacionais, estudos apontam que a própria estrutura de distribuição do crédito rural contribui para a exclusão relativa de agricultores mais vulneráveis, uma vez que os recursos tendem a concentrar-se em regiões com maior desenvolvimento institucional, presença de cooperativas, acesso a seguro rural e melhor infraestrutura produtiva (Mattei, 2015; Búrigo *et al.*, 2021; Valadares, 2021). Essa configuração reforça desigualdades territoriais históricas e limita o alcance das políticas públicas em áreas com menor integração econômica, como parte expressiva da Amazônia brasileira.

Observa-se ainda que agricultores com maior renda, capital produtivo e capacidade de garantias apresentam maior probabilidade de acesso ao financiamento, indicando seletividade socioeconômica persistente mesmo dentro do universo da agricultura familiar (Wesz Junior, 2021; Toledo; Zonin, 2021). Tal seletividade reduz o potencial redistributivo do crédito rural e evidencia a necessidade de instrumentos complementares que ampliem a inclusão financeira, como assistência técnica continuada, políticas de organização coletiva e mecanismos diferenciados de garantia. Portanto, a superação das barreiras de acesso e gestão do crédito exige abordagem sistêmica, capaz de articular financiamento, apoio institucional e

desenvolvimento territorial, condição essencial para que o crédito rural cumpra efetivamente seu papel como política pública de promoção do desenvolvimento rural sustentável.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar dos importantes avanços no fortalecimento da agricultura familiar, agricultores ainda enfrentam dificuldades no acesso ao crédito rural, mesmo em linhas e programas específicos como o PRONAF. Ademais, as condicionantes ambientais, embora fundamentais para a redução de práticas degradadoras, ainda precisam de melhorias no que tange à implementação, agilidade e comunicação entre diferentes setores. Por fim, o presente trabalho evidenciou as desigualdades históricas e suas consequências no acesso a subsídios, mesmo em programas especificamente voltados para a agricultura familiar, os quais ainda priorizam a produção de *commodities* como soja e pecuária. Por isso, faz-se necessário maiores estudos sobre a disparidade no acesso ao crédito rural e suas causas, de modo a orientar estratégias de redução de desigualdades e possibilitar a permanência e qualidade de vida de agricultores familiares no campo.

REFERÊNCIAS

- Lucarelli, F. (2004). Belém «Reloaded» the Story Teller (o narrador). De Versailles dos Trópicos a Paris n' América. Ediz. portoghese. Scientifichie Italiane.
- Remme, R. P., Meacham, M., Pellowe, K. E., Andersson, E., Guerry, A. D., Janke, B., Liu, L., Lonsdorf, E., Li, M., Mao, Y., Nootenboom, C., Wu, T., & van Oudenhoven, A. P. E. (2024). Aligning nature-based solutions with ecosystem services in the urban century. *Ecosystem Services*, 66, 101610. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2024.101610>
- Silva, G. I. N. da, Hermínio, P. J., Pinheiro, A. G., Jardim, A. M. D. R. F., Leite, R. M. C., Silva, T. G. F. da, & Souza, L. S. B. de. (2021). Entendendo as Características Associadas à Precipitação Para uma Região do Nordeste Paraense: Uma Análise do Comportamento, Tendência, Eventos Extremos e Tempo de Retorno para o período de 1973-2010. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(6), 3173–3192. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.6.p3173-3192>
- ABRAMOVAY, R. Agricultura familiar e desenvolvimento territorial. **Reforma agrária**, v. 28, n. 1, p. 2, 1998.
- ABRAMOVAY, R. O capital social dos territórios: repensando o desenvolvimento rural. **Economia Aplicada**, v. 4, n. abr/jun, p. 379-397, 2000.

- ALENCAR, I. P. V.; LUNAS, D. A. L.; CARDOSO JUNIOR, H. M. O conceito de território e a política de desenvolvimento territorial rural no Brasil. **Revista Territorial**, v. 8, n. 1, p. 73-83, 2019
- ALVES, A.; VIEIRA FILHO, J. E. R.; BRANCO, M. C. Sustainability-Related Rural Credit Policy Implementation and Effectiveness in Brazil. **Systems**, v. 13, n. 11, p. 1041, 19 nov. 2025.
- ASSUNÇÃO, J.; GANDOUR, C.; ROCHA, ROMERO; ROCHA, RUDI. The Effect of Rural Credit on Deforestation: Evidence from the Brazilian Amazon. **The Economic Journal**, v. 130, n. 626, p. 290–330, 1 fev. 2020.
- BACELAR, T.; FAVARETO, A. O papel da agricultura familiar para um novo de-senvolvimento regional nordeste –uma homenagem a Celso Furtado. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 51, p. 9-29, 2020.
- BACEN - BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Manual de Crédito Rural (MCR)**. Disponível em: <<https://www3.bcb.gov.br/mcr>> Acesso em: 05 jan 2026
- BRANDÃO, C. Desenvolvimento, territórios e escalas espaciais: levar na devida conta as contribuições da economia política e da geografia crítica para construir a abordagem interdisciplinar. In: RIBEIRO, M.T.F, MILANI, C.R.S. (orgs.) **Compreendendo a complexidade socioespacial contemporânea: o território como categoria de diálogo interdisciplinar**. Salvador: UFBA Salvador, 2008
- CORRÊA, A. T.; FILGUEIRAS, G. C.; CATIVO, C. K. V. A CONCESSÃO DE CRÉDITO RURAL E PRODUÇÃO FAMILIAR DE CACAU E AÇAÍ NO ESTADO DO PARÁ (2013-2021). **Revista de Administração e Negócios da Amazônia**, v. 16, n. 1, p. 1–24, 9 ago. 2024.
- DELGADO, N. D.; LEITE, S. P. Políticas de desenvolvimento territorial no meio rural brasileiro: novas institucionalidades e protagonismo dos atores. **DADOS –Revista de Ciências Sociais**, v. 54, n. 2, p. 431 – 473, 2011.
- DELGADO, N. G. Agronegócio e agricultura familiar no Brasil: desafios para a transformação democrática do meio rural. **Novos cadernos NAEA**, v. 15, n. 1, p. 85-129, 2012.
- ETGES, V. E.; CARISSIMI, E. Territórios luminosos e territórios opacos–uma análise à luz das contribuições de Milton Santos. **Revista do Desenvolvimento Regional**, v. 19, n. 1, p. 44-64, 2014.
- FARIA, W. R.; SILVA, F. M. DA; ALMEIDA, A. N. DE; BETARELLI JUNIOR, A. A. The relationship between rural credit policy and deforestation: evidence from Brazil. **Environmental Economics and Policy Studies**, v. 27, n. 2, p. 231–263, 23 abr. 2025.
- FOSSÁ, J. L.; MATTE, A.; MATTEI, L. F. A trajetória do Pronaf: análise das operações de crédito nos municípios brasileiros entre 2013 e 2020. **Extensão Rural**, v. 29, n. 1, p. e1, 18 maio 2022.
- FOSSÁ, J. L.; VILLWOCK, A. P. S.; MATTE, A. Análise da distribuição do Pronaf Custeio Agrícola. **Revista De Política Agrícola**, v. 35, n. e02062, 2026.

- GAZOLLA, M.; SCHNEIDER, S. Qual "fortalecimento" da agricultura familiar?: uma análise do Pronaf crédito de custeio e investimento no Rio Grande do Sul. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 51, n. 1, p. 45-68, 2013.
- GODOI, T. G.; BÚRIGO, F. L.; CAZELLA, A. A. A sustentabilidade dos financiamentos do PRONAF para agricultura familiar. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 38, p. 637-661, 2016.
- GUMIERO, R. G. A GOVERNANÇA DOS PLANOS MACRORREGIONAIS E O BALANÇO DO FUNDO CONSTITUCIONAL DE FINANCIAMENTO DO NORTE (FNO) PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL NA AMAZÔNIA. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 21, n. 2, 3 jun. 2025.
- JIMI, N. A.; NIKOLOV, P. V.; MALEK, M. A.; KUMBHAKAR, S. The effects of access to credit on productivity: separating technological changes from changes in technical efficiency. **Journal of Productivity Analysis**, v. 52, n. 1–3, p. 37–55, 19 dez. 2019.
- KIPKOGEL, S.; HAN, J.; MWALUPASO, G.; TANUI, J.; BRENYA, R. The synergistic effects of microcredit access and agricultural technology adoption on maize farmer's income in Kenya. **PLOS ONE**, v. 20, n. 1, p. e0316014, 6 jan. 2025.
- LOPES SILVA, B.; VITAL, T. W.; MARINHO DA SILVA, L.; PINTO XAVIER, M. G. UMA ANÁLISE DOS RECURSOS DO PRONAF PELO MODELO DE OPÇÃO PÚBLICA: DE 1995 A 2020. **Revista Grifos**, v. 32, n. 60, p. 01–19, 26 jan. 2023.
- MATTEI, L. Emprego agrícola: cenários e tendências. **Estudos Avançados**, v. 29, n. 85, p. 35-52, 2015.
- MILHOMENS, A.; ÁVILA, M. L.; CALDAS, E. L. Agroecologia e agricultura familiar: vulnerabilidades, resiliência e adaptação à mudança climática no Semiárido. In: SABOURIN, E.; OLIVEIRA, L. M. R.; GOULET, F.; MARTINS, E.S. (Orgs). **A ação pública de adaptação da agricultura à mudança climática no Nordeste semiárido brasileiro**. Rio de Janeiro: E-papers, 2021.
- MOREIRA-DANTAS, I. R.; MARTÍNEZ-ZARZOSO, I.; HENNING, C.; SOUZA DOS SANTOS, M. A. Rural credit acquisition for family farming in Brazil: Evidence from the Legal Amazon. **Journal of Rural Studies**, v. 101, p. 103041, jul. 2023.
- NOGUEIRA, A. C. M.; AMARAL, A. M. S.; ANDRADE, J. M. S.; AVELAR, J. S.; GÓES, B. C. Impacto do crédito rural no desenvolvimento da agricultura brasileira. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 16, n. 3, p. 1–16, 30 set. 2023.
- OLIVEIRA, M. F.; MENDES, L.; VASCONCELOS, A. C. VAN H. Desafios à permanência do jovem no meio rural: um estudo de casos em Piracicaba-SP e Uberlândia-MG. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 59, n. 2, 2021.
- OLIVEIRA, S. B.; OLIVEIRA, K. V.; OLIVEIRA V. S.; NASCIMENTO, T. S.; ALMEIDA, L. H. D.; RIBEIRO, J. A. H.; MORAES, D. G.; LACERDA, F. C. B. Influência de sistemas agroflorestais sucessionais na dinâmica da vegetação espontânea no município de Canaã dos Carajás, sudeste do estado do Pará. **Biodiversidade Brasileira**, v. 15, n. 1, p. 82-95, 2025.

- PAULA FILHO, G. X. DE; CALVI, M. F.; CASTRO, R. R. A. DE. Socioeconomic Analysis of Rural Credit and Technical Assistance for Family Farmers in the Transamazonian Territory, in the Brazilian Amazon. **Journal of Agricultural Science**, v. 8, n. 10, p. 177, 7 set. 2016.
- PAULETTO, D.; ARCO-VERDE, M. F.; SILVA, I. C.; LOPES, L. S. DE S.; ARAÚJO, A. J. C.; LUCAS, F. C. A.; SANTOS, S. F. DOS; VIEIRA, T. A.; DIAS, C. T. DOS S.; MARTORANO, L. G. Adoption and Diversity of Agroforestry Systems in the Amazon Biome: A Bibliometric Overview. **Land**, v. 14, n. 3, p. 524, 3 mar. 2025.
- QUADROS, T. C. F.; BARBOSA, M. J. S.; PINHEIRO, K. A. O.; CARNEIRO, F. S.; SANTOS, L. B.; RIOS, H. K. S.; FRAZÃO, A. S. Dos quintais florestais aos sistemas agroflorestais no município de Irituia-Pará-Brasil. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 3, p. e16812337958, 2023.
- RUGGIERO, P. G. C.; PEREDA, P. C.; PFAFF, A. When does higher credit lower forest area? Amazon contexts change credit's impacts. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 123, n. 12, 24 mar. 2026.
- SCHINATTO, A. G. C.; CARRARA, A. F. Acesso ao Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF). **Raízes: Revista de Ciências Sociais e Econômicas**, v. 41, n. 2, p. 422–446, 14 dez. 2021.
- SCHNEIDER, S. Mercados e agricultura familiar. In: MARQUES, F. C.; CONTERATO, M. A.; SCHNEIDER, S. (Org.). **Construção de mercados e agricultura familiar: desafios para o desenvolvimento rural**. Porto Alegre: UFRGS, 2016.
- SCHNEIDER, S.; TARTARUGA, I. G. P. Território e abordagem territorial: das referências cognitivas aos aportes aplicados à análise dos processos sociais rurais. **Raízes: Revista de Ciências Sociais e Econômicas**, v. 23, n. 1, 2004.
- SHAH, H.; HELLEGERS, P.; SIDERIUS, C. Climate risk to agriculture: A synthesis to define different types of critical moments. **Climate Risk Management**, v. 34, p. 100378, 2021.
- SILIPRANDI, E.; CINTRÃO, R. As mulheres agricultoras no programa de aquisição de alimentos (PAA). **Segurança Alimentar e Nutricional**, v. 18, p.12-32, 2011
- SILVA, S. P. **Políticas públicas, agricultura familiar e desenvolvimento territorial**. IPEA, Brasília Jan/2012
- SILVEIRA, M. P. C.; MONTENEGRO, R. L. G.; PEREIRA, P. A. R. Pronaf e desenvolvimento rural: uma análise para minas gerais nos anos de 2006 e 2017. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 62, n. 2, 2024.
- VALADARES, A. **O Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF): uma revisão bibliográfica (2009-2019)**. Rio de Janeiro: IPEA, 2021.
- VASCONCELOS, P. C. S.; GALVÃO, J. R.; PACHECO, M. J. B.; VIANA, T. C.; FREITAS, J. L. Caracterização dos sistemas agroflorestais em áreas de agricultores familiares em São Francisco do Pará. **Biodiversidade Brasileira**, v. 12, n. 2, 2022.

- VILANI, L.; ZANIN, A.; LIZOT, M.; TRENTIN, M. G.; AFONSO, P.; LIMA, J. D. DE. A Framework for Investment and Risk Assessment of Agricultural Projects. **Journal of Risk and Financial Management**, v. 17, n. 9, p. 378, 23 ago. 2024.
- VITORINO, L. V.; ERVATI, R. B.; GOMES, R. DA V. EDUCAÇÃO NO CAMPO E FINANCIAMENTO DO AGRONEGÓCIO: DESAFIOS E IMPACTOS DO CRÉDITO RURAL NA GESTÃO E PRODUÇÃO RURAL. **REVISTA FOCO**, v. 18, n. 5, p. e8544, 26 maio 2025.
- WANDERLEY, M. N. B. **O agricultor familiar no Brasil: um ator social da construção do futuro. Agricultura familiar camponesa na construção do futuro**. Rio de Janeiro: AS-PTA, 2009.
- WEST, T. A. P.; FEARNSIDE, P. M. Brazil's conservation reform and the reduction of deforestation in Amazonia. **Land Use Policy**, v. 100, p. 105072, jan. 2021.

CAPÍTULO III

AGROECOSSISTEMAS AMAZÔNICOS E SUSTENTABILIDADE: CAMINHOS PARA SISTEMAS PRODUTIVOS RESILIENTES NA AGRICULTURA FAMILIAR

AMAZONIAN AGROECOSYSTEMS AND SUSTAINABILITY: PATHWAYS TO RESILIENT PRODUCTION SYSTEMS IN FAMILY FARMING

DOI: 10.51859/amplla.mac6200-3

Hanna Ferreira de Souza¹

Ricardo Christin Lobato Machado²

Anna Maria Fontes do Amaral³

Vitória Luiza dos Passos⁴

Marcos Simehonno Castro do Nascimento⁵

Julia Isabella de Matos Rodrigues⁶

Brenda Cordovil Corrêa dos Santos⁷

¹ Mestranda em Ciências Florestais. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais – Universidade Federal Rural da Amazônia.

² Doutorando em ciências Florestais. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais – Universidade Federal Rural da Amazônia.

³ Engenheira Agrônoma, Universidade Federal Rural da Amazônia.

⁴ Engenheira Florestal pela Universidade Federal Rural da Amazônia.

⁵ Mestrando em Ciências Florestais. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais – Universidade Federal Rural da Amazônia.

⁶ Doutora em Ciências Florestais pela Universidade Federal Rural da Amazônia.

⁷ Doutora em Desenvolvimento Socioambiental pela Universidade Federal do Pará.

RESUMO

A região amazônica apresenta grande diversidade socioambiental e desempenha papel fundamental na manutenção de serviços ecossistêmicos essenciais para o equilíbrio climático e a conservação da biodiversidade. Nesse contexto, os agroecossistemas desenvolvidos por agricultores familiares representam importantes estratégias de produção agrícola associadas ao uso sustentável dos recursos naturais. Tais sistemas produtivos, quando manejados de forma adequada, podem contribuir para a conservação ambiental, para a segurança alimentar e para a valorização de conhecimentos tradicionais. Diante disso, a sustentabilidade agrícola torna-se um elemento central para a análise e compreensão das práticas produtivas presentes na Amazônia. O presente capítulo tem como objetivo discutir os principais aspectos relacionados à sustentabilidade em agroecossistemas amazônicos, com ênfase no papel da agricultura familiar na construção de sistemas

produtivos mais resilientes e ambientalmente responsáveis. Para isso, foi realizada uma revisão de literatura baseada em produções científicas que abordam agroecologia, sustentabilidade agrícola, agricultura familiar e sistemas produtivos na Amazônia. A análise das contribuições teóricas permitiu compreender como diferentes práticas agrícolas e estratégias de manejo contribuem para a manutenção da biodiversidade, para a ciclagem de nutrientes e para a redução de impactos ambientais. Os resultados da revisão indicaram que os agroecossistemas amazônicos apresentam elevado potencial para a implementação de práticas sustentáveis, especialmente quando fundamentados em conhecimentos locais e em modelos de produção que valorizam a diversidade biológica e cultural da região. Assim, o fortalecimento de sistemas produtivos resilientes torna-se um caminho importante para conciliar produção agrícola, conservação ambiental e desenvolvimento sustentável na Amazônia.

Palavras-chave: Agroecossistemas amazônicos; sustentabilidade agrícola; agricultura familiar; sistemas produtivos; Amazônia.

ABSTRACT

The Amazon region is characterized by great socio-environmental diversity and plays a fundamental role in maintaining ecosystem services that are essential for climate stability and biodiversity conservation. In this context, the agroecosystems developed by family farmers represent important agricultural production strategies linked to the sustainable use of natural resources. Such production systems, when managed appropriately, can contribute to environmental conservation, food security, and the valorization of traditional knowledge. Given this, agricultural sustainability becomes a central element for the analysis and understanding of production practices in the Amazon. This chapter aims to discuss the main aspects related to sustainability in Amazonian agroecosystems, with an emphasis on the role of family farming in building more resilient and

environmentally responsible production systems. To this end, a literature review was conducted based on scientific studies addressing agroecology, agricultural sustainability, family farming, and production systems in the Amazon. An analysis of the theoretical contributions provided insight into how different agricultural practices and management strategies contribute to the maintenance of biodiversity, nutrient cycling, and the reduction of environmental impacts. The results of the review indicated that Amazonian agroecosystems have high potential for the implementation of sustainable practices, especially when grounded in local knowledge and production models that value the region's biological and cultural diversity. Thus, strengthening resilient production systems becomes an important pathway to reconciling agricultural production, environmental conservation, and sustainable development in the Amazon.

Keywords: Amazonian agroecosystems; agricultural sustainability; family farming; production systems; Amazon.

1. INTRODUÇÃO

A Amazônia ocupa posição central nas discussões sobre sustentabilidade, pois reúne ampla diversidade biológica, riqueza sociocultural e relevante papel na manutenção do equilíbrio ambiental em escala regional e global. Além de sua importância ecológica, a região abriga agricultores familiares e diferentes grupos sociais que desenvolvem práticas produtivas historicamente associadas às condições locais de solo, clima, biodiversidade e uso dos recursos naturais. Nesse contexto, os agroecossistemas podem ser compreendidos como sistemas dinâmicos formados pela interação entre componentes ecológicos, sociais e econômicos, nos quais o manejo da produção está diretamente relacionado ao ambiente e às formas de organização do trabalho rural (Altieri; Nicholls, 2012; Gliessman, 2000).

Nas últimas décadas, a sustentabilidade agrícola passou a ocupar lugar de destaque no debate científico em razão dos impactos associados aos modelos convencionais de produção. A intensificação do uso do solo, a simplificação dos sistemas produtivos, a expansão das fronteiras agrícolas e a elevada dependência de insumos externos têm sido relacionadas à degradação ambiental, à perda de biodiversidade e ao aumento da vulnerabilidade dos sistemas agrícolas. Diante disso, torna-se necessário discutir alternativas produtivas capazes de conciliar rendimento, conservação dos recursos naturais e permanência das famílias no

campo, especialmente em regiões ambientalmente sensíveis, como a Amazônia (Caporal; Costabeber, 2004; Sartori; Latrônico; Campos, 2014).

Na realidade amazônica, a agricultura familiar desempenha papel importante tanto na produção de alimentos quanto na manutenção de práticas de manejo adaptadas às especificidades regionais. Em muitos casos, esses sistemas produtivos baseiam-se na diversificação de cultivos, no uso de espécies adaptadas às condições ecológicas locais e na incorporação de conhecimentos construídos pela experiência cotidiana no território. Por essa razão, a agricultura familiar não deve ser compreendida apenas por sua função econômica, mas também por sua contribuição para a conservação da diversidade biológica e cultural e para o fortalecimento do desenvolvimento rural sustentável (Schneider, 2016; Albani; Cousin; Dickmann, 2022).

Essas características favorecem a constituição de agroecossistemas mais complexos e potencialmente mais resilientes. Sistemas agrícolas baseados na diversidade produtiva e no manejo ecológico dos recursos naturais tendem a apresentar maior estabilidade, melhor aproveitamento dos recursos disponíveis e maior capacidade de resposta diante de pressões ambientais e socioeconômicas. No contexto amazônico, essa discussão torna-se ainda mais relevante, pois o equilíbrio entre produção e conservação depende, em grande medida, da valorização de práticas compatíveis com a dinâmica dos ecossistemas regionais e com os saberes associados ao uso tradicional da terra (Gliessman, 2000; Diegues, 2008).

Desse modo, discutir a sustentabilidade em agroecossistemas amazônicos implica refletir sobre estratégias produtivas que articulem conservação ambiental, segurança alimentar, diversidade biológica e fortalecimento da agricultura familiar. Com base nisso, o presente capítulo teve como objetivo discutir os principais aspectos relacionados à sustentabilidade em agroecossistemas amazônicos, com ênfase no papel da agricultura familiar na construção de sistemas produtivos resilientes e compatíveis com o desenvolvimento rural sustentável.

2. METODOLOGIA

Este capítulo caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa, de natureza descritiva e exploratória, desenvolvida por meio de revisão bibliográfica, a qual permite reunir, sistematizar e interpretar contribuições teóricas já produzidas sobre determinado tema,

favorecendo a construção de uma análise fundamentada em diferentes perspectivas sobre a realidade estudada (Creswell, 2014; Bardin, 2016).

O levantamento bibliográfico foi realizado com base em obras que abordam agroecologia, sustentabilidade agrícola, agricultura familiar, agroecossistemas amazônicos e sistemas produtivos resilientes. Para a composição do referencial teórico, foram considerados livros, artigos científicos, capítulos de livros, teses que abordaram a temática estudada e que contribuíram para a compreensão das práticas produtivas sustentáveis no contexto amazônico.

A seleção do material priorizou autores e estudos com diálogo direto com o objetivo do capítulo, especialmente aqueles voltados à relação entre produção agrícola, conservação ambiental e desenvolvimento rural sustentável. Nesse percurso, Caporal e Costabeber (2004) e Altieri e Nicholls (2012) foram mobilizados para fundamentar a discussão sobre agroecologia, sustentabilidade e desenho de agroecossistemas sustentáveis, enquanto Sartori, Latrônico e Campos (2014) e Schneider (2016) contribuíram para a compreensão da agricultura familiar, da organização produtiva e dos desafios do desenvolvimento rural no contexto brasileiro.

A análise do conteúdo foi conduzida de forma interpretativa e temática, buscando identificar aproximações entre os autores, conceitos recorrentes e contribuições teóricas relevantes para a discussão da sustentabilidade em agroecossistemas amazônicos. Para isso, o material consultado foi organizado em quatro eixos de análise: agroecossistemas amazônicos; sustentabilidade agrícola; práticas sustentáveis na agricultura familiar; e contribuições para sistemas produtivos resilientes. Esse procedimento permitiu compreender como diferentes estudos tratam a relação entre diversidade produtiva, uso responsável dos recursos naturais, valorização dos conhecimentos locais e fortalecimento da resiliência dos sistemas agrícolas (Bardin, 2016; Gliessman, 2000).

Dessa forma, a revisão bibliográfica constituiu a base metodológica do capítulo, possibilitando construir uma síntese analítica sobre o papel da agricultura familiar na promoção de sistemas produtivos mais sustentáveis na Amazônia. A partir desse percurso, tornou-se possível discutir alternativas produtivas que conciliem conservação ambiental, estabilidade dos agroecossistemas e desenvolvimento rural sustentável.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. AGROECOSSISTEMAS AMAZÔNICOS

A agroecologia oferece princípios, conhecimentos e metodologias voltados à construção de sistemas agrícolas sustentáveis, ao orientar o desenho e o manejo de agroecossistemas capazes de articular dimensões ambientais, sociais, culturais e econômicas (Altieri; Nicholls, 2012). Dessa maneira, a construção de agroecossistemas mais sustentáveis depende não apenas da adoção de técnicas adequadas de manejo, mas também do fortalecimento da extensão rural, da valorização dos conhecimentos locais e da adoção de estratégias produtivas compatíveis com a realidade amazônica. Nessa perspectiva, a transição agroecológica deve ser compreendida como um processo contínuo de reorganização e aperfeiçoamento dos sistemas de produção, voltado à redução dos impactos ambientais, à autonomia produtiva e ao fortalecimento da sustentabilidade agrícola (Caporal; Costabeber, 2004).

Na Amazônia, populações tradicionais e agricultores familiares utilizam conhecimentos ancestrais construídos a partir da observação dos ciclos ecológicos e da dinâmica das florestas. Práticas como a agricultura de corte e queima em pequena escala, os quintais agroflorestais, os roçados diversificados e diferentes formas de extrativismo contribuem para a segurança alimentar local e para a conservação da biodiversidade (Diegues, 2008). Na Amazônia e, particularmente, no Pará, as atividades rurais não se restringem ao cultivo agrícola ou à criação de animais, pois também envolvem o manejo da floresta e dos recursos aquáticos, como rios, igarapés, lagos, áreas de várzea e zonas costeiras. Dessa relação entre sistemas produtivos, florestas e águas, emergem alimentos, matérias-primas, formas de renda e práticas culturais fundamentais para os modos de vida locais (Sousa et al., 2022).

Estudos recentes sobre agroecologia e agroecossistemas familiares na Amazônia indicam que a sustentabilidade agrícola deve ser compreendida a partir da articulação entre dimensões ecológicas, produtivas, sociais, culturais, econômicas e políticas. Sousa et al. (2022) destacam que a agroecologia em agroecossistemas familiares amazônicos envolve o diálogo entre ciência, prática social, manejo dos recursos naturais e valorização dos conhecimentos locais. No contexto paraense, Sá et al. (2022) discutem a trajetória da agroecologia no estado do Pará, ressaltando sua relação com a pesquisa, a extensão rural, a formação e os desafios para sua consolidação. De modo complementar, Silva, Fonseca e Gouvêa (2022) evidenciam

que a diversificação produtiva constitui princípio essencial das agriculturas familiares na Amazônia Paraense, enquanto Fonseca e Silva (2024) reforçam que a agricultura familiar amazônica deve ser compreendida como heterogênea, multidimensional e territorialmente situada.

Por isso, a consolidação de agroecossistemas sustentáveis na Amazônia depende da articulação entre manejo adequado, diversidade produtiva, valorização dos conhecimentos locais, fortalecimento da assistência técnica e conservação dos recursos naturais, aspectos fundamentais para a construção de sistemas agrícolas mais sustentáveis e menos dependentes de insumos externos (Caporal; Costabeber, 2004; Altieri; Nicholls, 2012). No contexto amazônico, essa articulação também envolve o reconhecimento dos saberes locais, das práticas produtivas tradicionais e das relações estabelecidas entre agricultura familiar, floresta, água e biodiversidade (Diegues, 2008; Sousa et al., 2022). Esses elementos favorecem processos contínuos de transição agroecológica e ampliam a capacidade dos sistemas produtivos de responder às pressões ambientais, sociais e econômicas (Caporal; Costabeber, 2004; Sá et al., 2022).

3.2. SUSTENTABILIDADE AGRÍCOLA

A sustentabilidade é um conceito que define como agir e viver de forma socioambiental, defendendo um tipo de desenvolvimento econômico que seja justo socialmente e que utilize os recursos naturais de maneira responsável e sem desperdícios (Sartori; Latrônico; Campos, 2014). Discussões sobre desenvolvimento sustentável evidenciam a importância de compreender e aplicar o conceito de sustentabilidade (Verona, 2008). Para a aplicação, indicadores de sustentabilidade precisam ser utilizados, Van Bellen (2006) comparou três sistemas considerando critérios como escopo, níveis de atuação, tipos de dados, participação dos envolvidos e a facilidade de interpretação dos indicadores para avaliar a sustentabilidade.

No caso dos agroecossistemas, a sustentabilidade está diretamente relacionada à capacidade de reduzir dependências externas e fortalecer a autonomia produtiva (Caporal; Costabeber, 2004). No âmbito da agricultura, a sustentabilidade deixou de ser compreendida apenas como a capacidade de manter a produtividade ao longo do tempo. Com o avanço das pesquisas, passaram a ser considerados também aspectos como estabilidade produtiva, equidade social, uso responsável dos recursos naturais e viabilidade econômica dos sistemas

de produção. Assim, a sustentabilidade tornou-se um critério central de avaliação das propriedades rurais, envolvendo dimensões ambientais, biológicas, econômicas e socioculturais (Gomes; Mello; Mangabeira, 2009).

Desse modo, a sustentabilidade pressupõe melhorar as condições de vida no presente, reduzir desigualdades sociais e assegurar que o atendimento das necessidades atuais não comprometa as gerações futuras (Sartori; Latrônico; Campos, 2014). A sustentabilidade da paisagem rural é essencial para manter os serviços ecossistêmicos ao longo do tempo, garantindo benefícios como solo saudável, cultivos mais produtivos e maior diversidade biológica (Silva et al., 2019). Contudo, ainda são necessários avanços em pesquisas multidisciplinares para aperfeiçoar o desempenho dessas práticas nas áreas agrícolas, especialmente porque a agricultura familiar constitui importante agente social no processo de construção da sustentabilidade (Albani; Cousin; Dickmann, 2022).

3.3. PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS NA AGRICULTURA FAMILIAR

A capacidade de se adaptar a diferentes formas de produção e diversificar a renda fez da agricultura familiar um elemento essencial na modernização agrícola em várias cadeias agroindustriais. Ademais, a agricultura, ao passar dos anos, tende a cada vez ser mais influenciada pelo relacionamento direto com os fatores ambientais (Veiga, 1996). A transição da agricultura convencional para um modelo sustentável depende de fatores sociais, políticos e técnicos. Nesse processo, é fundamental contar com suporte organizacional que fortaleça as mudanças internamente, além de conhecimento técnico que permita conciliar produtividade econômica e equilíbrio ambiental. A busca por maior eficiência nos sistemas produtivos deve estar alinhada às condições ecológicas de cada área, reforçando o uso responsável dos recursos naturais e evitando sua degradação em médio e longo prazo (Gomes, 2005).

Com a adoção de práticas sustentáveis na agricultura familiar, os produtores rurais podem obter diferentes vantagens, como a diversificação produtiva, a ampliação das oportunidades de trabalho, a redução da dependência de insumos externos e a valorização comercial de determinados produtos. Além disso, a diminuição do uso de agrotóxicos contribui para a preservação do solo, da água e da biodiversidade, favorecendo sistemas produtivos mais equilibrados e duradouros (Peron et al., 2018; Gliessman, 2000).

Historicamente, as políticas agrárias brasileiras priorizaram grandes empreendimentos agrícolas, baseadas no modelo da Revolução Verde e no uso de tecnologias externas. Com isso, desconsideraram as capacidades coletivas fomentadas pela agricultura familiar, além de reduzir o espaço para alternativas de desenvolvimento mais adaptadas às realidades locais, não eram pautas importantes (Silva; Torres, 2018). Contudo, atualmente vem crescendo a preocupação com a melhoria dos sistemas produtivos para maior sustentabilidade em seu processo, o que impulsionou a ciência a estudar e fomentar formas de transicionar a agricultura convencional para uma agricultura ecológica.

Com base na literatura discutida, o Quadro 1 sintetiza práticas sustentáveis relevantes para a agricultura familiar amazônica, destacando suas contribuições ambientais, sociais e econômicas, bem como suas implicações para a resiliência dos agroecossistemas.

Quadro 1 – Práticas sustentáveis e suas contribuições para a resiliência dos agroecossistemas amazônicos

Prática sustentável	Contribuições		Implicações para a resiliência
	Ambientais	Socioeconômicas	
Diversificação de cultivos	Favorece a conservação da biodiversidade, estimula a ciclagem de nutrientes e contribui para a redução da incidência de pragas e doenças.	Amplia as possibilidades de produção e comercialização, fortalece a segurança alimentar e reduz a dependência de uma única atividade produtiva.	Eleva a capacidade de resposta do sistema frente a oscilações ambientais, climáticas e econômicas, reduzindo sua vulnerabilidade.
Sistemas agroflorestais	Promovem a conservação do solo, a manutenção da cobertura vegetal, a proteção dos recursos hídricos e o equilíbrio ecológico.	Possibilitam diversificação produtiva, geração de renda e melhor aproveitamento dos recursos disponíveis no território.	Favorecem maior estabilidade ecológica e produtiva, contribuindo para a adaptação do sistema a diferentes condições ambientais.
Manejo ecológico do solo	Melhora a fertilidade do solo, aumenta o teor de matéria orgânica e reduz processos de degradação e erosão.	Diminui a necessidade de insumos externos e fortalece a sustentabilidade produtiva em médio e longo prazo.	Contribui para a manutenção da produtividade e para a estabilidade funcional do agroecossistema ao longo do tempo.
Redução do uso de insumos químicos	Minimiza a contaminação do solo, da água e dos alimentos, além de favorecer a manutenção da biodiversidade local.	Reduz custos de produção, amplia a valorização de produtos sustentáveis e fortalece a autonomia das famílias agricultoras.	Reduz a dependência externa e amplia a capacidade de permanência e adaptação dos sistemas produtivos em contextos de instabilidade.
Valorização dos conhecimentos locais	Favorece práticas de manejo compatíveis com as condições ecológicas regionais e com o uso	Reforça a identidade produtiva, reconhece a experiência dos agricultores e fortalece os	Amplia a capacidade adaptativa do agroecossistema a partir de estratégias

Prática sustentável	Contribuições		Implicações para a resiliência
	Ambientais	Socioeconômicas	
	equilibrado dos recursos naturais.	vínculos comunitários e territoriais.	construídas historicamente no próprio contexto local.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026), com base em Altieri e Nicholls (2012), Caporal (2009), Caporal e Costabeber (2004), Gliessman (2000), Diegues (2008), Veiga (1996), Albani, Cousin e Dickmann (2022), Peron et al. (2018), Pereira et al. (2013), Baldicera (2024), Gomes et al. (2024) e Bevenuto, Correa e De Andrade (2025).

Observa-se que a resiliência dos agroecossistemas amazônicos não depende de um único fator, mas da articulação entre diversidade produtiva, manejo sustentável dos recursos naturais, valorização dos conhecimentos locais e fortalecimento da agricultura familiar. Nessa perspectiva, a adoção dessas práticas contribui para a construção de sistemas produtivos mais estáveis e adaptáveis.

3.4. CONTRIBUIÇÕES PARA SISTEMAS PRODUTIVOS RESILIENTES

Com o objetivo de suprir as demandas atuais sem comprometer a segurança alimentar das futuras gerações, os agroecossistemas precisam aliar alta produtividade à capacidade de adaptação e resiliência. Assim, a manutenção da produtividade agrícola ao longo do tempo depende da adoção de práticas que garantam a produção de alimentos de forma sustentável (Pereira et al., 2013).

Exemplificando, o cultivo em mandalas agrícolas pode servir como uma estratégia concreta para a aplicação dos princípios da agroecologia dentro dos sistemas produtivos. As mandalas favorecem a diversificação dos sistemas produtivos, aspecto essencial para o aprimoramento alimentar dos agricultores e para o aumento da resiliência diante das mudanças climáticas e pressões ambientais. A variedade de culturas e espécies organizadas nesses sistemas contribui para o equilíbrio ecológico, estimulando o controle biológico de pragas, a ciclagem de nutrientes e a melhoria da qualidade do solo. A diversificação constitui base fundamental de sistemas sustentáveis, ao proporcionar benefícios ecológicos e socioeconômicos, como maior segurança alimentar e geração de renda (Bevenuto; Correa; Andrade, 2025).

A adoção de práticas agrícolas sustentáveis, incluindo a agroecologia e os sistemas agroflorestais, desempenha papel importante na melhoria da qualidade e da segurança dos alimentos, ao promover sistemas produtivos mais equilibrados e integrados ao meio

ambiente. Técnicas como o manejo sustentável do solo, a diversificação de culturas, a integração entre espécies e a redução do uso de insumos químicos contribuem para a conservação dos recursos naturais e para a produção de alimentos mais seguros. Portanto, essas práticas fortalecem a resiliência dos agroecossistemas e podem favorecer melhores condições socioeconômicas na agricultura familiar (Gomes et al., 2024).

4. CONCLUSÃO

A discussão desenvolvida ao longo deste capítulo evidencia que a sustentabilidade dos agroecossistemas amazônicos depende da articulação entre fatores ambientais, sociais, econômicos e culturais. Nesse cenário, a agricultura familiar assume papel fundamental, pois reúne práticas produtivas que dialogam com a diversidade ecológica da região e com formas de manejo historicamente construídas a partir da experiência dos agricultores em seus territórios.

Os estudos analisados mostram que a adoção de práticas sustentáveis, como a diversificação de cultivos, o manejo ecológico do solo, a redução da dependência de insumos externos e a valorização dos conhecimentos locais, contribui para a formação de sistemas produtivos mais equilibrados e resilientes. Tais estratégias favorecem não apenas a conservação ambiental, mas também a segurança alimentar, a estabilidade produtiva e a permanência das famílias no meio rural.

Além disso, a reflexão sobre os agroecossistemas amazônicos permite compreender que a sustentabilidade agrícola não se limita ao aumento da produtividade, mas envolve a capacidade de produzir de forma socialmente responsável, ambientalmente adequada e economicamente viável. Assim, fortalecer a agricultura familiar e incentivar modelos produtivos compatíveis com a realidade amazônica constitui caminho importante para a promoção do desenvolvimento rural sustentável.

Conclui-se, portanto, que os agroecossistemas amazônicos representam uma alternativa relevante para a construção de sistemas produtivos resilientes, capazes de conciliar produção agrícola, conservação dos recursos naturais e valorização das especificidades regionais. Consequentemente, o incentivo a práticas sustentáveis e ao fortalecimento da agricultura familiar torna-se essencial para enfrentar os desafios contemporâneos da sustentabilidade na Amazônia.

REFERÊNCIAS

- ALBANI, I. C.; COUSIN, C. da S.; DICKMANN, I. Agricultura familiar e sustentabilidade. **Ambiente & Educação**, Rio Grande, v. 27, n. 1, p. 1-27, 2022.
- ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I. **Agroecologia: princípios e estratégias para uma agricultura sustentável**. 3. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2012.
- BALDICERA, A. Práticas agrícolas sustentáveis e suas implicações para a segurança alimentar: sustainable agricultural practices and their implications for food security. **Revista UNICREA - Revista Técnico Científica da Universidade Corporativa do Crea-SC**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 113-126, 2024.
- BARDIN, Laurence. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2016.
- BEVENUTO, V. V.; CORREA, M. M.; ANDRADE, L. P. de. Mandalas agrícolas: um caminho para transições socioecológicas e a diversificação dos sistemas produtivos. **Cadernos de Agroecologia**, v. 20, n. 1, 2025.
- CAPORAL, F. R. A extensão rural agroecológica: a importância da luta por um novo paradigma. In: CANUTO, J. C.; COSTABEBER, J. A. (org.). **Agroecologia: caminhos da transição agroecológica**. Porto Alegre: Emater/RS, 2009.
- CAPORAL, F. R.; COSTABEBER, J. A. **Agroecologia e extensão rural: contribuições para a promoção do desenvolvimento rural sustentável**. Brasília: MDA/SAF/DATER-IICA, 2004.
- CRESWELL, John W. **Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches**. 4. ed. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2014.
- DIEGUES, Antonio Carlos. **O mito moderno da natureza intocada**. 6. ed. São Paulo: Hucitec, 2008.
- FONSECA, Luiz Carlos Neves da; SILVA, Luís Mauro Santos. A formação socioprodutiva da agricultura familiar amazônica: heterogeneidade social e diversificação produtiva no território paraense. **Novos Cadernos NAEA**, Belém, v. 27, n. 2, p. 201-227, maio/ago. 2024. DOI: 10.18542/ncn.v27i2.15494.
- GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2000.
- GOMES, E. da S. et al. O impacto da agricultura sustentável na qualidade e segurança dos alimentos. In: **Excelência técnica e sustentabilidade nas Ciências Agrárias 2**. [S. l.: s. n.], 2024. p. 1-15.
- GOMES, E. G.; MELLO, J. C. C. B. S. de; MANGABEIRA, J. A. de C. Estudo da sustentabilidade agrícola em município amazônico com análise envoltória de dados. **Pesquisa Operacional**, v. 29, n. 1, p. 23-42, 2009.

- GOMES, I. Sustentabilidade social e ambiental na agricultura familiar. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 5, n. 1, 2005.
- PEREIRA, R. S. de P. et al. Contribuições da pesquisa como princípio educativo para o desenho de agroecossistemas resilientes: reflexões a partir de uma experiência educativa agroecológica na Amazônia Paraense. **Cadernos de Agroecologia**, v. 8, n. 2, 2013.
- PERON, C. C.; OLMEDO, J. P.; DELL'ACQUA, M. M.; SCALCO, F. L. G.; CINTRÃO, J. F. F. Produção orgânica: uma estratégia sustentável e competitiva para a agricultura familiar. **Retratos de Assentamentos**, [S. l.], v. 21, n. 2, p. 104-127, 2018.
- SÁ, Tatiana de Abreu; SOUSA, Romier da Paixão; RIBEIRO, Raimundo; MARQUES, Zélia. Agroecologia na Amazônia: trajetórias, pesquisa, extensão, formação e perspectivas no Pará. In: SOUSA, Romier da Paixão; COELHO, Roberta de Fátima Rodrigues; ROSAL, Louise Ferreira; SUZUKI, Júlio César (org.). **Agroecologia: diálogos entre ciência e práxis em agroecossistemas familiares na Amazônia**. São Paulo: FFLCH/USP, 2022. p. 17-49. DOI: 10.11606/9788575064245.
- SARTORI, S.; LATRÔNICO, F.; CAMPOS, L. M. S. Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável: uma taxonomia no campo da literatura. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 1-22, 2014.
- SCHNEIDER, Sergio. Mercados e agricultura familiar. In: MARQUES, F. C.; CONTERATO, M. A.; SCHNEIDER, S. (org.). **Construção de mercados e agricultura familiar: desafios para o desenvolvimento rural**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2016.
- SILVA, Luís Mauro Santos; FONSECA, Luiz Carlos Neves da; GOUVÊA, Jéssica Carolina Souza. A diversificação como princípio essencial das agriculturas familiares na Amazônia Paraense. In: SOUSA, Romier da Paixão; COELHO, Roberta de Fátima Rodrigues; ROSAL, Louise Ferreira; SUZUKI, Júlio César (org.). **Agroecologia: diálogos entre ciência e práxis em agroecossistemas familiares na Amazônia**. São Paulo: FFLCH/USP, 2022. p. 142-179. DOI: 10.11606/9788575064245.
- SILVA, Sérgio Aparecido Seixas da; RODRIGUES, Suellen Fernanda Manguiera; MODRO, Anna Frida Hatsue; ROSELL, Eduardo Cândido Franco; SOUZA, Emanuel Fernando Maia de. Indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas de urucuzeiro e sua relação com os visitantes florais. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 29-45, 2019. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2019.001.0004.
- SOUSA, Romier da Paixão; COELHO, Roberta de Fátima Rodrigues; ROSAL, Louise Ferreira; SUZUKI, Júlio César (org.). **Agroecologia: diálogos entre ciência e práxis em agroecossistemas familiares na Amazônia**. São Paulo: FFLCH/USP, 2022. DOI: 10.11606/9788575064245.
- VAN BELLEN, H. M. **Indicadores de sustentabilidade: uma análise comparativa**. Rio de Janeiro: FGV, 2006.
- VEIGA, José Eli da. Agricultura familiar e sustentabilidade. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, [S. l.], v. 13, n. 3, p. 383-404, 1996.

VERONA, L. A. F. **Avaliação de sustentabilidade em agroecossistemas de base familiar e em transição agroecológica na região sul do Rio Grande do Sul.** 2008. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2008.

CAPÍTULO IV

PERSPECTIVAS E EVIDÊNCIAS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL NA AMAZÔNIA

PERSPECTIVES AND EVIDENCE OF SUSTAINABLE FOREST MANAGEMENT IN THE AMAZON

DOI: 10.51859/amplla.mac6200-4

Thayna Ixóra Rodrigues dos Santos¹

Henderson Monteiro Ramos Junior²

Joathan Cipriano Castro³

Marcele Farias Pereira⁴

Julia Isabella de Matos Rodrigues⁵

Walmer Bruno Rocha Martins⁶

¹ Engenheira Florestal. Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA, Belém, Pará, Brasil

² Engenheiro Florestal. Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA, Belém, Pará, Brasil

³ Mestrado em andamento no Programa de Pós-graduação em Uso Sustentável dos Recursos Naturais em regiões Tropicais, Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável - ITV DS

⁴ Mestre em Ciências Florestais. Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA, Belém, Pará, Brasil

⁵ Doutora em Ciências Florestais, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém Pará, Brasil

⁶ Doutor em Ciências Florestais, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém Pará, Brasil

RESUMO

O bioma Amazônico desempenha um papel indispensável na regulação climática global e na preservação da biodiversidade. No entanto, a exploração predatória tem agravado esse cenário de degradação, tornando urgente a adoção de estratégias que permitam a conservação, sendo o Manejo Florestal Sustentável (MFS) uma atividade capaz de conciliar a produção econômica com a conservação ambiental. O presente estudo realiza uma revisão sobre o manejo na região com o objetivo de sintetizar ferramentas de monitoramento, além de discutir os impactos da extração convencional e a falta de planejamento de infraestrutura, contrastando-os com os benefícios da exploração de impacto reduzido (EIR). Além disso, destaca-se a evolução do monitoramento, que integra os inventários florestais a tecnologias de precisão, como o georreferenciamento, além dos indicadores climáticos e faunísticos. Concluindo-se que o MFS atua como um sistema integrado, onde indicadores de solo, floresta, fauna e comunidades se atrelam aos propósitos legais de sustentabilidade, sendo uma estratégia robusta para enfrentar os problemas atuais e manter os serviços ecossistêmicos, além de garantir um futuro sustentável para gerações futuras.

Palavras-chave: Ecossistema. Amazônia. Biodiversidade. Manejo sustentável.

ABSTRACT

The Amazon biome plays an indispensable role in global climate regulation and biodiversity preservation. However, predatory exploitation has worsened this degradation scenario, making the adoption of conservation strategies urgent, with Sustainable Forest Management (SFM) being an activity capable of reconciling economic production with environmental conservation. This study reviews forest management in the region with the objective of synthesizing monitoring tools, as well as discussing the impacts of conventional logging and the lack of infrastructure planning, contrasting them with the benefits of reduced-impact logging (RIL). Furthermore, it highlights the evolution of monitoring, which integrates forest inventories with precision technologies, such as georeferencing, alongside climate and faunal indicators. It concludes that SFM acts as an integrated system, where soil, forest, fauna, and community indicators are linked to legal sustainability goals, serving as a robust strategy to address current problems, maintain ecosystem services, and ensure a sustainable future for upcoming generations.

Keywords: Ecosystem. Amazon. Biodiversity. Sustainable Management.

1. INTRODUÇÃO

As florestas tropicais são vitais para a manutenção dos serviços ecossistêmicos em escala global, exercendo influência direta na regulação climática e no sequestro de carbono (Berhanu et al., 2023). Além de abrigar uma grande biodiversidade, a Amazônia detém cerca de 38% do carbono estocado em florestas tropicais do mundo (Chaddad et al., 2022). Intensificando esse cenário, a enorme disponibilidade de recursos naturais atrai explorações predatórias e ilegais que comprometem a integridade da floresta (Moura; Marinho; Veloso, 2021). Nesse contexto, o Manejo Florestal Sustentável (MFS) surge como uma alternativa rentável à manutenção da biodiversidade e da floresta em pé (Amaral et al., 2019; Ângelo et al., 2014; Louman et al., 2004). Distinguindo-se da exploração ilegal, essa prática no Brasil é amparada juridicamente pela política de concessões florestais Lei nº 11.284, 2006 (Brasil, 2006) e regulamentada pelas diretrizes do Código Florestal Lei nº 12.651, 2012 (Brasil, 2012), buscando o equilíbrio entre os benefícios econômicos, ambientais e sociais (Garrido Filha, 2002; Brasil, 1995).

Nessa perspectiva, para mitigar os danos físicos à vegetação e ao solo, a implementação do corte de impacto reduzido (EIR) é uma atividade indispensável para garantir a resiliência e a produtividade da floresta para as gerações futuras (Louman et al., 2004; McEvoy, 2004). A viabilidade e o monitoramento dessas práticas depende do uso de indicadores ecológicos e critérios de sustentabilidade, como os preconizados pela Organização Internacional de Madeira Tropical (ITTO, 2024). Entre essas ferramentas, o inventário florestal e os parâmetros fitossociológicos se consolidam como figuras centrais, fornecendo dados detalhados que servem de orientação para as intervenções silviculturais e ações de conservação (Amaral et al., 2019; Sandel; Carvalho, 2000; Costa et al., 2002; Valério et al., 2008).

A mensuração de biomassa acima do solo (AGB) também é um importante indicador para validar o manejo como estratégia de mitigação climática e retenção de carbono (Qin et al., 2021). Tendo em vista que a estocagem de biomassa enfrenta ameaças constantes frente às pressões antrópicas, o monitoramento através de equações alométricas (Chave et al., 2014) permite quantificar os impactos na estrutura do ecossistema (Gatti et al., 2021). Diante disso, o presente estudo buscou realizar uma revisão sobre o manejo florestal na Amazônia, tendo como objetivo a sintetização das evidências científicas que avaliam os impactos da atividade

e o uso de indicadores como ferramentas de monitoramento, na manutenção dos parâmetros fitossociológicos e na estabilidade do armazenamento de AGB, consolidando um panorama fundamental para a sustentabilidade operacional na região.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. MANEJO FLORESTAL: DEFINIÇÃO E IMPORTÂNCIA

As florestas são fundamentais para a vida nos ecossistemas terrestres e estão interligadas aos valores ambientais, culturais, econômicos e sociais (Floriani et al., 2019). Dentre os serviços oferecidos, destacam-se o sequestro de carbono (CO₂), a conservação da biodiversidade e a proteção dos mananciais de água (Viana, 2002). Por conta disso, o desenvolvimento estratégico de técnicas ligadas ao uso sustentável dos recursos, de forma a garantir a manutenção da biodiversidade, como o manejo florestal, se torna imprescindível.

Nesse cenário, os primeiros métodos de manejo florestal tiveram origem nas atividades de agricultura no final do século XIX, baseando-se na sustentabilidade de suprimento de madeira (Bettinger et al., 2017). Atualmente, a atividade é reconhecida como uma alternativa viável para assegurar a manutenção da cobertura florestal natural, sem que haja a necessidade de promover alterações na utilização do solo de áreas sujeitas ao manejo (Braz et al., 2007). Porém, para ser efetivo, a atividade deve obedecer o tripé da sustentabilidade, sendo este: ecologicamente correto, economicamente viável e socialmente justo (Amaral et al., 2019; Ângelo et al., 2014).

Reconhecida mundialmente, a prática do manejo florestal é vista como mecanismo para manter a floresta em pé, contanto que haja ações de fiscalização e monitoramento, a fim de promover a disseminação de conhecimento por meio de capacitações de profissionais, produtores e comunidades locais (Silva et al., 2009). Como resultado, ao trabalhar dentro da legalidade, o produtor diminui os riscos e conquista mercados que apreciam práticas de origem controlada, viabilizando incentivos socioeconômicos e contribuindo com a integridade da floresta (Louman et al., 2004).

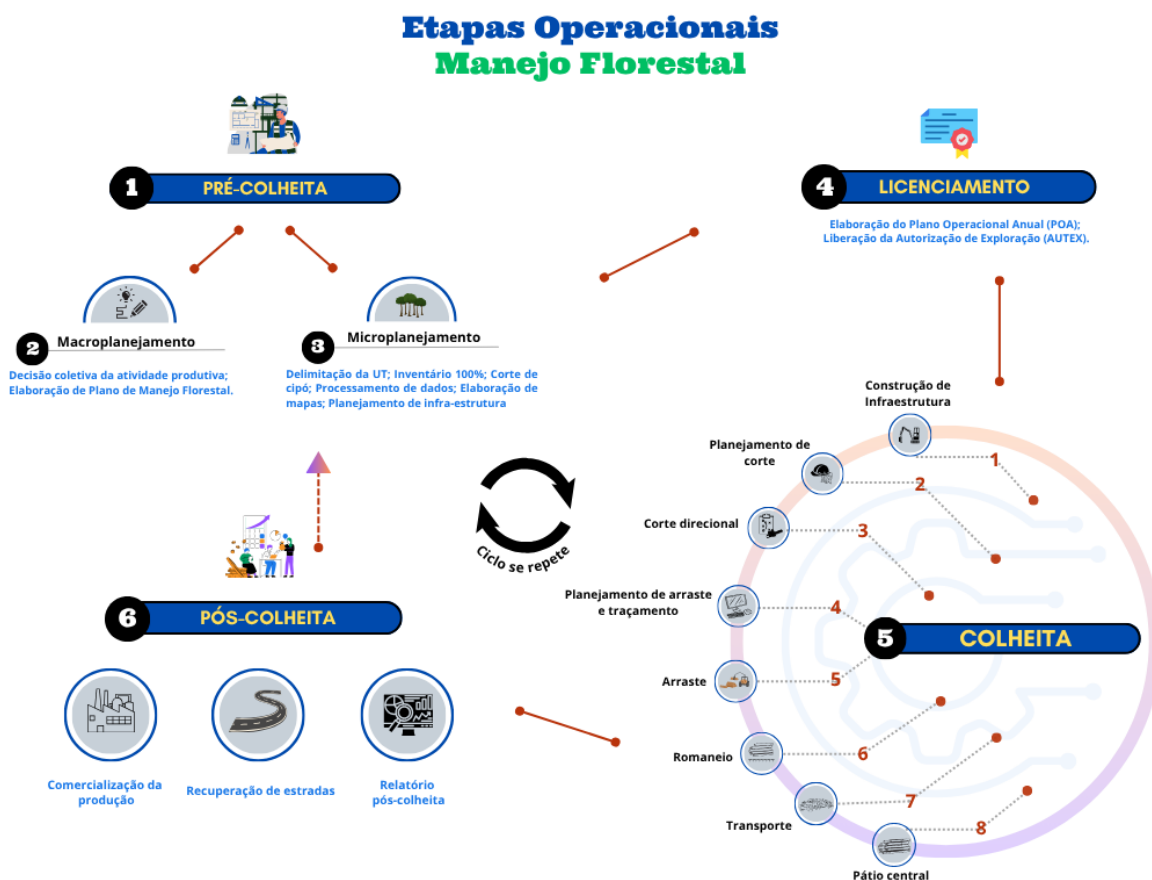
Apesar da exploração ilegal ser um mercado ainda lucrativo num curto prazo devido aos custos operacionais e a exploração predatória imediata, o MFS surge com vantagens superiores, que ao atuar dentro das conformidades elimina não somente problemas jurídicos mas também proporciona qualidade do recurso e o acesso aos mercados que valorizam a certificação (Silva; Souza, 2023). No cenário nacional, a exploração de florestas públicas é

regida pela Lei de Gestão de Florestas Públicas (Lei nº 11.284/2006) e regulamentada pelo Decreto nº 5.975/2006 (Brasil, 2006), que mantém a obtenção de benefícios econômicos, sociais e ambientais, respeitando os mecanismos de sustentação do ecossistema (Rodrigues et al., 2020; Brasil, 2006; Braz et al., 2007; Garrido Filha, 2002).

Nesse contexto, para que as necessidades ambientais e sociais da lei não ocasione prejuízos diante a posição do mercado ilegal, estudos recentes reforçam que a economia pode ser viabilizada por serviços ecossistêmicos, como a Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD+), no qual o valor do carbono retido atua no suporte financeiro para cobrir os custos de uma exploração de impacto reduzido (Berhanu et al., 2023; Bousfield et al., 2022; Chaddad et al., 2022).

As práticas do manejo florestal variam de acordo com o tipo de floresta, sua localização e os objetivos da exploração. Portanto, para assegurar a sustentabilidade operacional, a atividade deve ser executada em seis etapas principais (Figura 1): 1) Pré-colheita; 2) Macroplanejamento; 3) Microplanejamento; 4) Licenciamento; 5) Colheita e 6) Pós-colheita (Dias Júnior et al., 2020; Lechner et al., 2020; Achard; Hansen, 2013; Defries, 2013; Gama et al., 2005).

Figura 1 - Etapas operacionais do manejo florestal, desde o planejamento meticuloso da pré-colheita até a transformação da madeira em produtos finais



Fonte: Adaptado de Miranda et al., 2020.

2.2. IMPACTOS DO MANEJO

Na região amazônica, a extração predatória de madeira ocasiona impactos severos ao ecossistema florestal, essa prática acarreta a destruição da biodiversidade, a redução da disponibilidade de recursos hídricos, o assoreamento de rios e reservatórios, bem como provoca a deterioração física e química dos solos, além de gerar outros impactos ambientais (Silva et al., 2016).

Os danos começam na fase inicial de planejamento da infraestrutura, com a ausência de mapas digitais precisos e sem detalhamento prévio do terreno, com aberturas de estradas e pátios de estocagem bem maiores do que o necessário, resultando na destruição de áreas de vegetação que poderiam e deveriam permanecer intactas (Braz et al., 2007). Portanto, esse descuido não apenas afeta o sistema de operação, mas desencadeia processos de erosões

severas que, em casos mais graves, levam à invasão acidental de Áreas de Preservação Permanente (APP) (Braz et al., 2007).

Outro aspecto que merece atenção é a seleção de árvores baseada no interesse comercial, prática conhecida como “*high grading*”, no qual ao colher as espécies de maior valor de mercado, aumenta-se o risco de exaustão dessas populações, deixando de lado uma vegetação funcionalmente simplificada e homogênea (Bousfield et al., 2022). Adicionalmente, a derrubada de árvores, sem as devidas técnicas de impacto reduzido, compromete as espécies vizinhas no momento da queda, gerando uma mortalidade expressiva, o que desestrutura o ambiente e prejudica o abrigo da fauna local (Bousfield et al., 2022).

Para organizar a conexão das ações de exploração e os prejuízos causados, as principais consequências ambientais anteriormente mencionadas foram interligadas aos seus indicadores de monitoramento apropriados sugeridos para medir essas mudanças (Tabela 1).

Tabela 1 - Impactos ecológicos do manejo florestal e seus indicadores de monitoramento

Impacto do manejo	Consequência ecológica	Indicador de monitoramento	Fonte
Abertura de estradas e pátios	Erosão e perda de vegetação em apps	Mapeamento georreferenciado	Braz et al. (2007)
<i>High grading</i> (seleção comercial)	Alteração da composição florística	Índice de Shannon-Wiener e Índice de Valor de Importância	Lima et al. (2021) Castro et al. (2018)
Derrubada sem técnicas RIL	Mortalidade de árvores remanescentes	Taxa de mortalidade	Januário et al. (2017) De Oliveira et al. (2024)
Perda de carbono florestal	Emissões por degradação	Biomassa acima do solo (AGB)	Qin et al. (2021) Chave et al. (2014)

Fonte: Os autores (2026), com base na literatura consultada.

Diante do exposto, o manejo desenfreado pode não apenas desconfigurar a composição florística do bioma, mas também acarretar impactos graves para a fauna (De Souza et al., 2018; Ferronato; Oliveira, 2010). Essa prática, principalmente motivada pela necessidade econômica e pela falta de sensibilização na conservação do meio ambiente,

juntamente com a ausência de fiscalização dos órgãos competentes, resultam em uma redução alarmante na qualidade ambiental da região, comprometendo os serviços ecológicos (WWF, 2024). Apesar da gravidade dessas consequências, a escassez de estudos científicos voltados para a avaliação do estado da floresta no período de pós-extração ilegal ainda é recorrente, entretanto dados comparativos globais e estudo quantitativo em florestas tropicais permitem compreender um pouco da severidade desses danos (Tabela 2).

Tabela 2 - Impactos na Amazônia: Ilegalidade vs. Manejo Sustentável

Dimensão do Impacto	Extração Ilegal/Atividades Ilícitas	Manejo Florestal Sustentável (MFS)	Fonte
Escala da ilegalidade	Taxas de extração estimadas em: Bolívia (80%), Peru (80-90%) e Brasil (>50% na Amazônia)	Implementação de sistemas de rastreio como o DOF (Brasil) para garantir a origem legal; Florestas plantadas e controladas já atingem 95% das exportações de produtos madeireiros	IUFRO (2016)
Estrutura e biomassa	Técnicas predatórias causam o dobro de danos residuais; A extração convencional recupera apenas 77% da biomassa em 16 anos	Recuperação da biomassa original em 16 anos	West et al. (2014) <i>apud</i> IUFRO (2016)
Carbono e solo	Carbono reduzido a 76% dos níveis de floresta primária	Sequestro acelerado por meio da regeneração natural; Taxas de erosão de 100 a 3.000 vezes menores do que as registradas em trilhas de arraste da extração ilegal	Putz et al. (2012) <i>apud</i> IUFRO (2016)
Economia	Perda global de receita estatal entre USD 9 e 26 bilhões/ano	O MFS é 2x mais eficiente para geração de valor e impostos; O valor da madeira processada legalmente pode exceder US\$ 200/m³	Gutiérrez-Vélez (2008) IUFRO (2016)
Social	Violência extrema, chegando a 50% dos assassinatos de defensores ambientais no Brasil	Geração de empregos formais com melhor renda e segurança	Global Witness (2014) <i>apud</i> IUFRO (2016)

Fonte: Os autores (2026), com base na literatura consultada.

2.3. USO DE INDICADORES PARA MONITORAR OS IMPACTOS DO MANEJO

A aplicação de critérios e indicadores, conforme fundamentada pela Organização Internacional de Madeira Tropical (ITTO, 2024), é uma abordagem essencial para gerir o sucesso da gestão sustentável das florestas ao redor do mundo. No cenário brasileiro, essa prática foi recentemente apurada pela norma ABNT NBR 157889:2025, estabelecendo diretrizes específicas para o manejo de florestas nativas, funcionando como análises contínuas da saúde florestal, colaborando com a transparência e a participação dos envolvidos na ação de conservação.

Os inventários florestais se tornam a base de uma compreensão profunda sobre a dinâmica da floresta, onde o uso de parcelas permanentes, monitoradas ao longo das décadas permite acompanhar o desenvolvimento da vida florestal, carregando taxas de crescimento, permitindo o acompanhamento de indivíduos e mortalidade natural ou induzida (Januário; De Oliveira e Oliveira, 2017; De Oliveira et al., 2024). Essas informações são cruciais para que a gestão possa adaptar a intensidade da colheita e garantir que a estrutura da vegetação esteja equilibrada para os ciclos futuros (Lima et al., 2021).

A evolução do manejo florestal de precisão introduziu indicadores tecnológicos que permitiram elevar o monitoramento em campo (Braz et al., 2007). O uso de receptores de GPS de alta sensibilidade e a delimitação de áreas georreferenciadas permitem a rastreabilidade de cada intervenção, assegurando que a abertura de estradas e pátios ocorra estritamente onde o planejamento autorizou (ABNT, 2025). Essa precisão digital funciona como um indicador de conformidade, minimizando erros de localização e protegendo zonas sensíveis que, em métodos convencionais, poderiam ser atingidas acidentalmente (Braz et al., 2007).

A implantação do uso de sensoriamento remoto mediante o sistema Light Detection and Ranging (LiDAR) ganham destaque com o inventário 100% e o microplanejamento de infraestrutura, onde a emissão de pulsos de laser aerotransportados proporcionam o mapeamento da topografia sob o dossel com certa precisão, importante para o planejamento de estradas e pátios de estocagem em curva de nível (Braz et al., 2007). Nessa circunstância, essa tecnologia fornece não apenas a eliminação de possíveis riscos em áreas protegidas, mas também serve para aprimorar as estimativas de AGB tanto na fase pré quanto na pós colheita (Lechner et al., 2020).

Para avaliar a integridade biológica, o monitoramento utiliza técnicas fitossociológicas clássicas, como os de Shannon-Wiener e Pielou, que permitem verificar se a diversidade e a uniformidade das espécies permanecem estáveis após a colheita (Lima et al., 2021). Essas métricas colaboram como um diagnóstico da capacidade de resiliência, indicando que, sob o manejo de impacto reduzido, é possível manter níveis de diversidade elevados, muitas vezes similares aos de florestas intocadas (Castro et al., 2018). Entretanto, a ciência moderna tem expandido indicadores complementares faunísticos, como a assembleia de morcegos animalívoros, que reagem rapidamente às mudanças de abertura do dossel (Castro et al., 2022).

Em suma, os indicadores de monitoramento passaram por expansão que integram esferas climática e social, seguindo regras do mercado global e das novas políticas públicas (Bousfield et al., 2022). Na atualidade, essas exigências englobam desde a capacidade do ecossistema em manter os estoques de carbono até as mudanças no cotidiano das comunidades, fornecendo acesso aos direitos básicos (Imaflora, 2025). Nesse contexto, é fundamental entender essa ligação, pois através dela é possível perceber o funcionamento do manejo como um sistema, onde os indicadores se atrelam aos objetivos legais (Figura 2).

O esquema do processo sistêmico gera um volume de dados que englobam desde atividades em campo com as coordenadas georreferenciadas até o histórico das transações do Documento de Origem Florestal (DOF), onde a convergência desses fluxos aos ambientes de Big Data gera a integração e a automatização de dados públicos e privados (Achard; Hansen, 2013). Consequentemente, essa ação avançada de governança viabiliza o cruzamento de informações estatísticas para constatação de práticas de fraude e inconformidades na cadeia de custódia, garantindo a segurança jurídica do manejo no mercado global (Imaflora, 2025; Achard; Hansen, 2013).

Figura 2 - Abordagem sistêmica do manejo: integridade de indicadores biofísicos e sociais aos objetivos legais da sustentabilidade



Fonte: Autoria própria (2026), com base na literatura consultada: Imaflora (2025); Bousfield et al. (2022).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS

O Manejo Florestal Sustentável na Amazônia, quando planejado e executado com rigor técnico e respaldo legal, constitui uma alternativa viável à exploração predatória, pois concilia a produção madeireira com a conservação da biodiversidade e a manutenção dos serviços ecossistêmicos. Nesse contexto, os indicadores ecológicos, fitossociológicos e de biomassa acima do solo (AGB) são componentes principais para o monitoramento da dinâmica florestal, permitindo avaliar os impactos, orientar intervenções silviculturais e fortalecer o manejo como estratégia de mitigação climática. Porém, a efetividade depende da superação de desafios históricos, como o planejamento inadequado, a exploração seletiva de espécies comerciais (*high grading*) e a fragilidade da fiscalização.

Diante disso, as perspectivas para o setor se conectam com o manejo de precisão, onde o uso do LiDAR e o processamento de dados passam a atuar fortemente no controle de impactos. Logo, sendo essa transformação digital capaz de atuar na rastreabilidade da madeira às exigências de conformidade e de certificações atuais, mas para que o seu sucesso seja alcançado, a gestão depende do fortalecimento dos pilares sociais e da segurança jurídica. Assim, recomenda-se que futuras pesquisas e políticas públicas integrem dados fitossociológicos e estoques de carbono, fortalecendo a prática do MFS como instrumento estratégico para a conservação e o uso sustentável das florestas amazônicas.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15789: Manejo florestal sustentável — princípios, critérios e indicadores para florestas nativas. Rio de Janeiro: ABNT, 2025. 44 p.
- ACHARD, F.; HANSEN, M. C. **Global forest monitoring from earth observation**. Boca Raton: CRC Press, 2013. (Earth observation of global changes).
- AMARAL, M. R. M.; LIMA, A. J. N.; HIGUCHI, F. G.; DOS SANTOS, J.; HIGUCHI, N. Dynamics of Tropical Forest Twenty-Five Years after Experimental Logging in Central Amazon Mature Forest. **Forests**, v. 10, n. 2, p. 89, 2019. DOI: 10.3390/f10020089.
- ÂNGELO, H.; DA SILVA, J. C.; DE ALMEIDA, A. N.; POMPERMAYER, R. S. Análise estratégica do manejo florestal na Amazônia brasileira. **Floresta**, v. 44, n. 3, p. 341, 2014. DOI: 10.5380/ufv.v44i3.33979.
- BERHANU, Y.; DALLE, G.; SINTAYEHU, D. W.; KELBORO, G.; NIGUSSIE, A. Land use/land cover dynamics driven changes in woody species diversity and ecosystem services value in tropical rainforest frontier: a 20-year history. **Heliyon**, v. 9, n. 2, 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e13711.
- BETTINGER, P.; BOSTON, K.; SIRY, J. P.; GREBNER, D. L. **Forest management and planning**. 2nd ed. London: Elsevier/Academic Press, 2017.
- BOUSFIELD, C. G.; MASSAM, M. R.; PERES, C. A.; EDWARDS, D. P. Carbon payments can cost-effectively improve logging sustainability in the Amazon. **Journal of Environmental Management**, v. 314, 2022. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115094.
- BRASIL. Lei nº 11.284, de 2 de março de 2006. Dispõe sobre a gestão de florestas públicas para a produção sustentável. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/l11284.htm. Acesso em: 27 maio 2026.
- BRASIL. Lei nº 12.651. Instituiu o novo Código Florestal. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso em: 27 maio 2026.
- BRAZ, E. M.; FIGUEIREDO, E. O.; OLIVEIRA, M. V. N. d.; PASSOS, C. A. M. Manejo florestal de precisão: modelo digital de exploração e manejo de florestas naturais. In: FIGUEIREDO, E. O.; BRAZ, E. M.; OLIVEIRA, M. V. N. d'. (org.). **Manejo de precisão em florestas tropicais: modelo digital de exploração e manejo de florestas naturais**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2007. p. 17–29. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/502004>. Acesso em: 26 maio 2026.
- CASTRO, A. B.; BOBROWIEC, P. E. D.; CASTRO, S. J.; RODRIGUES, L. R. R.; FADINI, R. F. Influence of reduced-impact logging on Central Amazonian bats using a before-after-control-

- impact design. **Animal Conservation**, v. 25, n. 2, p. 311–322, 2022. DOI: 10.1111/acv.12739.
- CASTRO, M. S. A.; VIANA, A. P. d. S.; LOBATO, C. C.; MUNIZ, J. L.; LIMA, M. W. dos S.; MELO, L. de O. Impactos da exploração florestal na estrutura e na composição florística da vegetação remanescente em área manejada na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará. **Revista Agroecossistemas**, v. 10, n. 2, p. 125–135, 2018. DOI: 10.18542/ragros.v10i2.5174.
- CHADDAD, F.; MELLO, F. A. O.; TAYEBI, M.; SAFANELLI, J. L.; CAMPOS, L. R.; AMORIM, M. T. A.; BARBOSA DE SOUSA, G. P.; FERREIRA, T. O.; RUIZ, F.; PERLATTI, F.; GRESCHUK, L. T.; ROSIN, N. A.; FIM ROSAS, J. T.; DEMATTÊ, J. A. M. Impact of mining-induced deforestation on soil surface temperature and carbon stocks: A case study using remote sensing in the Amazon rainforest. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 119, 2022. DOI: 10.1016/j.jsames.2022.103983.
- CHAVE, J. et al. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global Change Biology**, v. 20, n. 10, p. 3177–3190, 2014. DOI: 10.1111/gcb.12629.
- COSTA, D. H. M.; CARVALHO, J. O. P.; SILVA, J. N. M. Dinâmica da composição florística após a colheita de madeira em uma área de terra firme na Floresta Nacional do Tapajós (PA). **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, n. 38, p. 67–90, 2002.
- DE SOUZA, A. P.; DA COSTA, F. C. P.; DE ALENCAR, R. F.; BARBOSA LIMA, S. F. Exploração e utilização do potencial madeireiro da Caatinga no município de Aurora – estado do Ceará. **Pesquisa e Ensino em Ciências Exatas e da Natureza**, v. 2, n. 2, p. 158–168, 2018. DOI: 10.29215/pecen.v2i2.1070.
- DEFRIES, R. Why Forest Monitoring Matters to the Planet. In: ACHARD, F.; HANSEN, M. (org.). **Global Forest Monitoring from Earth Observation**. Boca Raton: CRC Press, 2013. p. 1–18.
- DIAS JÚNIOR, C. F. *et al.* Measure: sistema de coleta de informações para inventário florestal. **Tecno-Lógica**, v. 24, n. 1, p. 103–111, 2020. DOI: 10.17058/tecnolog.v24i1.13689.
- FERRONATO, M. L.; NUNES, R. de O. A exploração ilegal de madeiras na terra indígena sete de setembro, Cacoal – RO. **Revista Facimed**, v. 2, n. 2, p. 1–12, 2010.
- FLORIANI, N.; SKEWES, J. C.; RÍOS, F. T.; SILVA, A. de A.; HALISKI, A. M.; SHIRAISHI-NETO, J. Territorialidades da convivencialidade e do sentirpensar com as florestas comunitárias tradicionais na América Latina. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 50, p. 21–48, 2019. DOI: 10.5380/dma.v50i0.65389.
- GARRIDO FILHA, I. Manejo florestal: questões econômico-financeiras e ambientais. **Estudos Avançados**, v. 16, n. 45, p. 91–106, 2002. DOI: 10.1590/S0103-40142002000200007.
- GATTI, L. et al. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. **Nature**, v. 595, n. 7867, p. 388–393, 2021. DOI: 10.1038/s41586-021-03629-6.

- GUTIERREZ-VELEZ, V. H.; MACDICKEN, K. Quantifying the direct social and governmental costs of illegal logging in the Bolivian, Brazilian, and Peruvian Amazon. **Forest Policy and Economics**, v. 10, n. 4, p. 248–256, 2008.
- INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION (ITTO). **Annual report 2024**. Yokohama, 2025. Disponível em: https://www.itto.int/annual_report/. Acesso em: 23 de maio 2026.
- JANUÁRIO, J. L.; D'OLIVEIRA, M. V. N.; OLIVEIRA, L. C. Estimativa da dinâmica de crescimento em floresta manejada no sudoeste da Amazônia. **Forest Ecology and Management**, v. 392, p. 36–44, 2017. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.02.049.
- KLEINSCHMIT, D.; MANSOURIAN, S.; WILDBURGER, C.; PURRET, A. (org.). **Illegal logging and related timber trade: dimensions, drivers, impacts and responses: a global scientific rapid response assessment report**. Vienna: IUFRO, 2016. 148 p. (IUFRO World Series, v. 35).
- LECHNER, A. M.; FOODY, G. M.; BOYD, D. S. Applications in Remote Sensing to Forest Ecology and Management. **One Earth**, v. 2, n. 5, p. 405–412, 2020. DOI: 10.1016/j.oneear.2020.05.001.
- LIMA, B. de A.; NICOLETTI, M. F.; STEPKA, T. F.; CARVALHO, S. de P. C.; MELO, L. de O.; CRUZ, G. da S. Efeitos da exploração de impacto reduzido (EIR) na composição florística e estrutura de uma floresta ombrófila densa na Amazônia Brasileira. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 131, 2021. DOI: 10.18671/scifor.v49n131.23.
- LOUMAN, B.; CAMINO, R. V.; CARRERA, F.; GALLOWAY, G. Aspectos generales. In: OROZCO VÍLCHEZ, L. (org.). **Planificación del manejo diversificado de bosques latifoliados húmedos tropicales**. Turrialba: CATIE, 2004, p. 1–49.
- MIRANDA, K.; AMARAL NETO, M.; SOUSA, R.; COELHO, R. Manejo florestal sustentável em unidades de conservação de uso comunitário na Amazônia. **Sociedade & Natureza**, v. 32, p. 778–792, 2020. DOI: 10.14393/SN-v32-2020-51621.
- MOURA, V. M.; MARINHO, J. A. M.; VELOSO, G. A. Dinâmica de Uso da Terra em Senador José Porfírio – PA, Amazônia Oriental. **Revista Verde Grande: Geografia e Interdisciplinaridade**, v. 3, n. 2, p. 74–95, 2021.
- NEVES D'OLIVEIRA, M. V.; MILLER, R. P.; OLIVEIRA, L. C.; BRAZ, E. M.; THAINES, F.; JANUÁRIO, J. L.; ACUÑA, M. H. A. Growth dynamics of an Amazonian forest: Effects of reduced impact logging and recurring atypical climate events during a 20-year study. **Forest Ecology and Management**, v. 562, 2024. DOI: 10.1016/j.foreco.2024.121937.
- QIN, Y.; XIAO, X.; WIGNERON, J. P.; CIAIS, P.; BRANDT, M.; FAN, L.; LI, X.; CROWELL, S.; WU, X.; DOUGHTY, R.; ZHANG, Y.; LIU, F.; SITCH, S.; MOORE, B. Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 5, p. 442–448, 2021. DOI: 10.1038/s41558-021-01026-5.

- RODRIGUES, M. I.; SOUZA, Á. N. de; JOAQUIM, M. S.; LUSTOSA JUNIOR, I. M.; PEREIRA, R. S. Concessão florestal na Amazônia brasileira. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 4, p. 1299–1308, 2020. DOI: 10.5902/1980509821658.
- SANDEL, M. P.; CARVALHO, J. O. P. de. Composição florística e estrutura de uma área de cinco hectares de mata alta sem babaçu na Floresta Nacional do Tapajós. Embrapa Amazônia Oriental, 2000. 19 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 63). Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/382690/composicao-floristica-e-estrutura-de-uma-area-de-cinco-hectares-de-mata-alta-sem-babacu-na-floresta-nacional-do-tapajos?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 27 maio 2026.
- SILVA, E. R. D.; FERREIRA LEITE, H. M.; DA SILVA DE OLIVEIRA MOTA, L. H; BRITO, M. B. U; SOUZA, A. P. Vulnerabilidade à erosão da área de manejo florestal do Rio Liberdade, Tarauacá – Acre. **Agrotrópica**, v. 28, n. 3, p. 285–296, 2016. DOI: 10.21757/0103-3816.2016v28n3p285-296.
- SILVA, J. M.; SOUZA, R. F. O manejo florestal sustentável versus o desmatamento ilegal. **Observatório Latino-Americano y Caribeño**, v.7. n. 1, p. 86–100, 2023. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8724492>. Acesso em: 27 maio 2026.
- SILVA, K. E. da; RIBEIRO, C. A. Á. S.; MARTINS, S. V.; SANTOS, N. T. Concessões de florestas públicas na Amazônia: desafios para o uso sustentável dos recursos florestais. **Bioikos – Título não-corrente**, v. 23, n. 2, p. 91-102, 2009.
- VALÉRIO, Á. F.; WATZLAWICK, L. F.; SAUERESSIG, D.; PUTON, V.; PIMENTEL, A. Análise da composição florística e da estrutura horizontal de uma Floresta Ombrófila Mista Montana, município de Irati, PR – Brasil. **Revista Acadêmica: Ciência Animal**, v. 6, n. 2, p. 137–147, 2008. DOI: 10.7213/cienciaanimal.v6i2.10448.
- VIANA, V. M. As florestas brasileiras e os desafios do desenvolvimento sustentável: manejo, certificação e políticas públicas apropriadas. Tese (Livre Docência) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001255749>. Acesso em: 24 de maio 2026.
- WORLD WILDLIFE FUND FOR NATURE (WWF). Extração de madeira. Disponível em: https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/areas_prioritarias/amazonia1/ameacas_riscos_amazonia/desmatamento_na_amazonia/extracao_de_madeira_na_amazonia/. Acesso em: 10 de março de 2024.

CAPÍTULO V

ANÁLISE ESPACIAL DO USO E COBERTURA DO SOLO EM ÁREAS ANTROPIZADAS, EM DISTRITOS DA REGIÃO DE UNAÍ-MG

SPATIAL ANALYSIS OF LAND USE AND LAND COVER IN ANTHROPOGENIC AREAS IN DISTRICTS OF THE UNAÍ-MG REGION

DOI: 10.51859/ampla.mac6200-5

Luiz Gustavo Alves Caldeira ¹

Lucas Gabryel Maciel dos Santos ²

Carmem Lúcia da Silva Surmani ³

Marinaldo Loures-Ferreira ⁴

Adelson Pereira dos Santos ⁵

Chauanny Cordeiro de Sousa ⁶

¹ Bacharel em Engenharia Agrícola e Ambiental - UFVJM.

² Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal - UFVJM.

³ Graduanda em Engenharia Agrícola e Ambiental - UFVJM.

⁴ Pós-Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal - UFVJM.

⁵ Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal - UFVJM.

⁶ Bacharela em Agronomia - UFVJM.

RESUMO

O presente estudo visou identificar e quantificar as classes de uso e cobertura do solo em áreas antropizadas em sobreposição a Áreas de Preservação Permanente (APPs) hídricas nos distritos de Rural Minas e Unaí, região de Unaí/MG, por meio de geoprocessamento e análise espacial. O trabalho fundamentou-se no Código Florestal (Lei nº 12.651/2012) e no Cadastro Ambiental Rural (CAR). Foram utilizados dados do IDE-Sisema e CAR, processados no software QGIS. Os resultados revelaram que a pastagem constitui quase 50% do uso em APPs hídricas, e que 86,7% das áreas antropizadas estão a até 10 metros de cursos d'água, evidenciando potenciais riscos ambientais à qualidade da água e à integridade dos ecossistemas ripários. A sobreposição com imóveis rurais do CAR permite identificar propriedades potencialmente em desacordo com a legislação vigente, embora sejam necessárias ressalvas quanto à consistência dos dados autodeclaratórios. Conclui-se que o geoprocessamento é crucial para a gestão de dados ambientais, auxiliando órgãos fiscalizadores, entidades financeiras e consultores ambientais no planejamento e conformidade legal.

Palavras-chave: APPs. CAR. Geoprocessamento. Gestão ambiental.

ABSTRACT

This study aimed to identify and quantify land use and cover classes in anthropized areas overlapping with Permanent Preservation Areas (APPs) of water resources in the districts of Rural Minas and Unaí, Unaí/MG region, through geoprocessing and spatial analysis. The work was based on the Forest Code (Law nº 12.651/2012) and the Rural Environmental Registry (CAR). Data from IDE-Sisema and CAR were used and processed in QGIS software. Results revealed that pasture constitutes almost 50% of the land use within riparian APPs, and that 86.7% of anthropized areas are within 10 meters of watercourses, evidencing potential environmental risks to water quality and the integrity of riparian ecosystems. The overlay with CAR rural property data allows for the identification of properties potentially non-compliant with current legislation, although caveats regarding the consistency of self-declared data are necessary. It is concluded that geoprocessing is crucial for environmental data management, assisting inspection agencies, financial entities, and environmental consultants in planning and legal compliance.

Keywords: APPs. CAR. Geoprocessing. Environmental management.

1. INTRODUÇÃO

As Áreas de Preservação Permanente (APPs) constituem um dos principais instrumentos da política ambiental brasileira voltados à conservação dos recursos naturais (Machado Júnior & Machado, 2025). Estabelecidas pela Lei nº 12.651/2012, essas áreas exercem funções ecológicas fundamentais, incluindo a proteção dos recursos hídricos, a conservação da biodiversidade, a estabilidade geológica, o controle de processos erosivos e a manutenção dos serviços ecossistêmicos essenciais para a sustentabilidade dos sistemas produtivos e das comunidades humanas (BRASIL, 2012).

Entre as diferentes categorias de APPs previstas na legislação brasileira, destacam-se aquelas associadas aos cursos d'água, cuja função é atuar como zonas de amortecimento entre os ambientes terrestres e aquáticos (Chaves et al., 2023). Essas áreas desempenham papel estratégico na regulação do ciclo hidrológico, na retenção de sedimentos, na filtragem de contaminantes provenientes das atividades agropecuárias e na manutenção da qualidade e quantidade dos recursos hídricos (Durigan et al., 2022).

Apesar de sua relevância ambiental, as APPs vêm sendo historicamente submetidas a processos de ocupação antrópica decorrentes da expansão agropecuária, da implantação de infraestrutura rural e do crescimento urbano (Degaspari et al., 2025). A conversão da vegetação nativa em áreas destinadas à produção agrícola e pecuária tem provocado alterações significativas na dinâmica da paisagem, resultando na fragmentação dos ecossistemas, aumento da erosão dos solos, assoreamento de corpos hídricos e redução da capacidade de provisão de serviços ecossistêmicos (Fonseca et al., 2022).

Nesse contexto, o Cadastro Ambiental Rural (CAR) surge como um importante instrumento de regularização e monitoramento ambiental dos imóveis rurais brasileiros (Horn, 2024). Instituído pelo Código Florestal, o CAR reúne informações georreferenciadas sobre limites das propriedades, Áreas de Preservação Permanente, Reservas Legais, remanescentes de vegetação nativa e áreas consolidadas de uso antrópico (Paula et al., 2021). Além de subsidiar programas de regularização ambiental, essa base de dados possibilita a realização de análises espaciais em larga escala voltadas à identificação de conflitos de uso da terra e à avaliação da conformidade ambiental dos imóveis rurais (Paiva et al., 2021).

O avanço das geotecnologias, especialmente dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), do sensoriamento remoto e das bases de dados geoespaciais públicas, tem ampliado

significativamente a capacidade de monitoramento territorial (Dritsas & Trigka, 2025). Ferramentas como o MapBiomas, o Cadastro Ambiental Rural e as Infraestruturas de Dados Espaciais (IDEs) permitem integrar informações ambientais e fundiárias, favorecendo análises espaciais capazes de identificar padrões de ocupação, quantificar alterações na cobertura do solo e subsidiar ações de fiscalização e planejamento ambiental (Silva et al., 2025).

Dessa forma, a utilização integrada dessas bases de dados representa uma abordagem eficiente para avaliar a ocorrência de áreas antropizadas em APPs hídricas e identificar imóveis rurais potencialmente em desacordo com a legislação ambiental vigente (Almeida et al., 2026). Além disso, tais análises contribuem para a formulação de estratégias de recuperação ambiental e fortalecimento das políticas públicas voltadas à gestão sustentável do território (Barasal Morales et al., 2026).

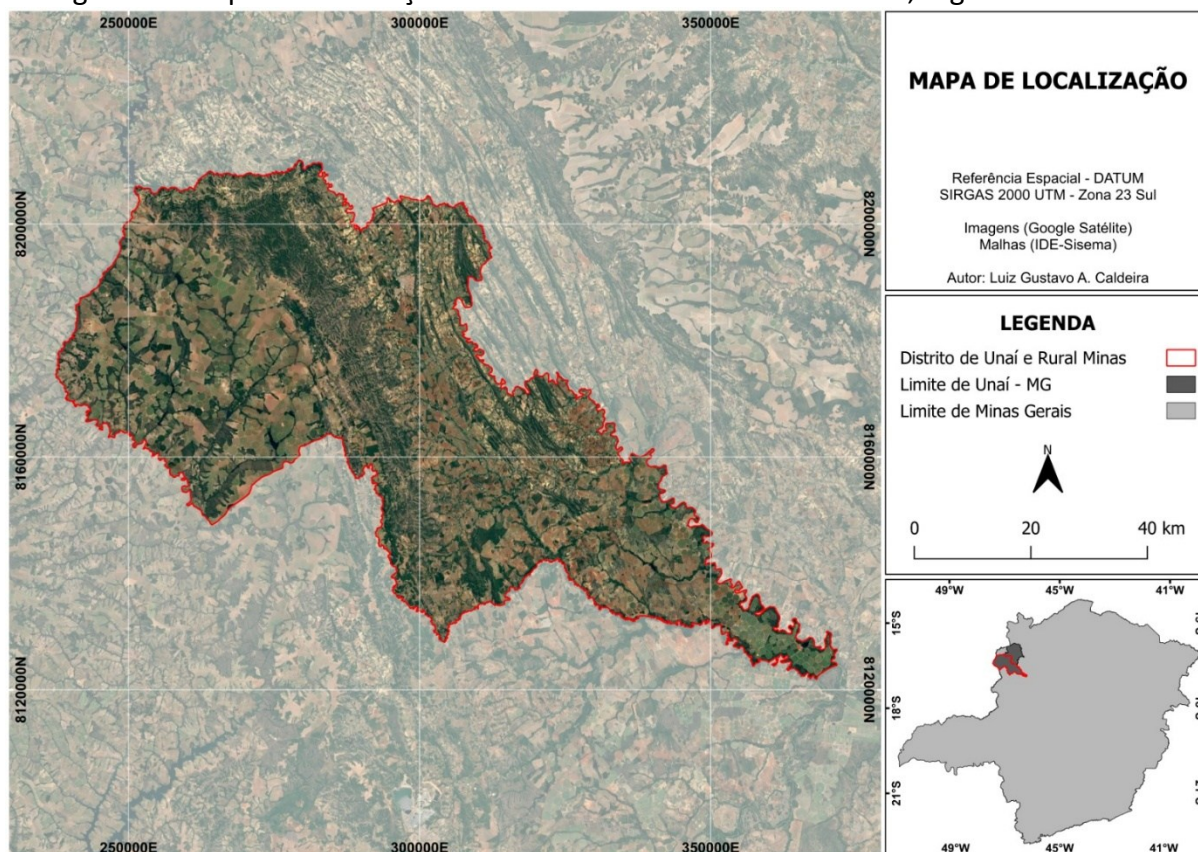
Assim, o presente estudo teve como objetivo identificar e quantificar as classes de uso e cobertura do solo presentes em áreas antropizadas sobrepostas às APPs hídricas nos distritos de Rural Minas e Unaí, Minas Gerais, bem como relacionar essas ocorrências aos imóveis cadastrados no Cadastro Ambiental Rural, utilizando técnicas de geoprocessamento e análise espacial.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. VISÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

Os distritos de Rural Minas e Unaí, Figura 1, pertencem a região de Unaí, Minas Gerais. A região apresenta um índice pluviométrico médio anual de 1.400 e 1.500 mm, com a temperatura média anual das máximas oscilando entre 29°C e 31°C, e das mínimas entre 15°C e 17°C. Possuindo clima tropical, com inverno seco (Aw), de acordo com a classificação climática de Köppen (Naime et al., 2014), com área de aproximadamente 488.846 ha nos dois distritos.

Figura 1 – Mapa de localização dos distritos de Rural Minas e Unaí, região de Unaí-MG



Fonte: Autoria própria.

2.2. DESCRIÇÃO DOS DADOS

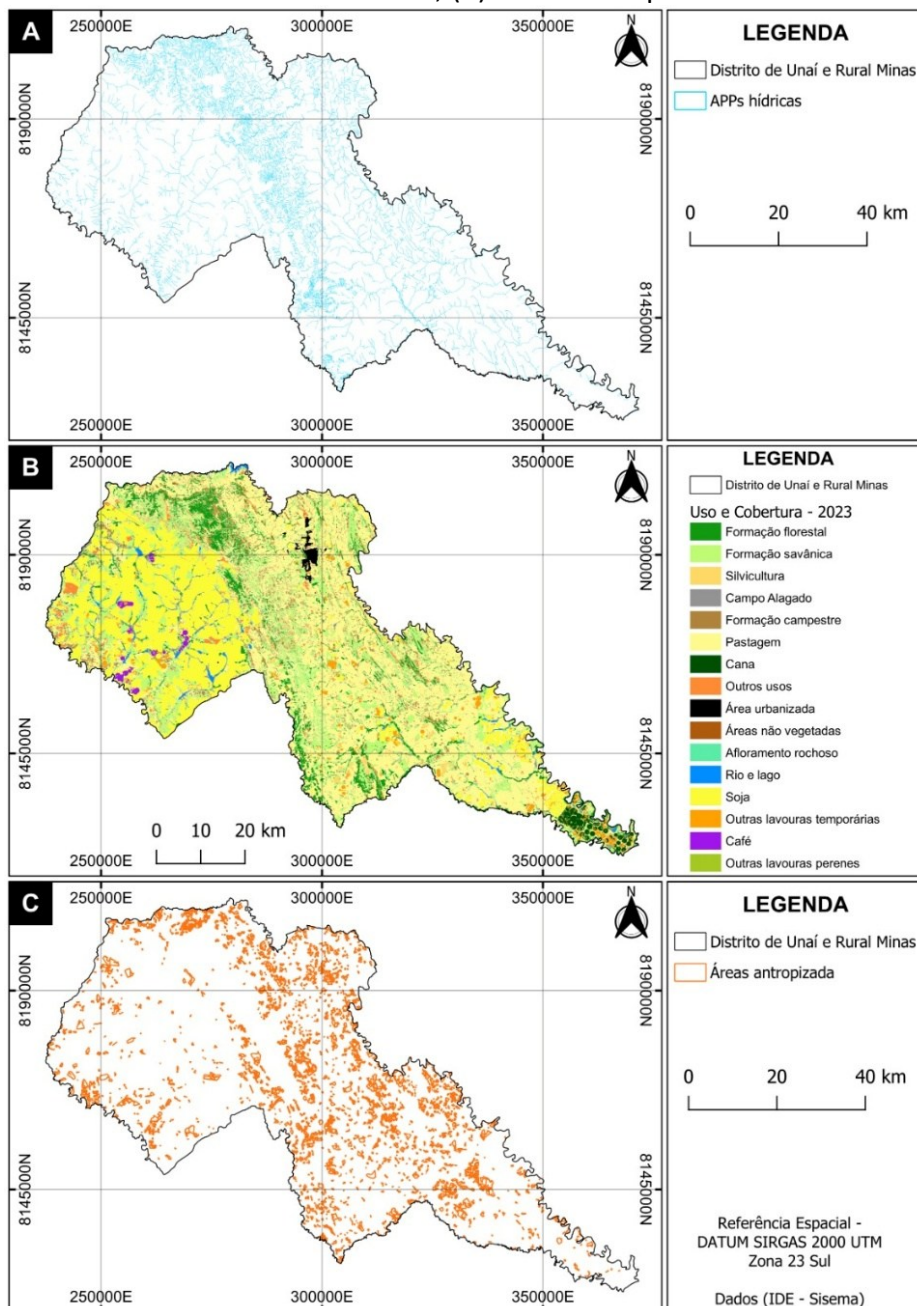
O banco de dados utilizado no trabalho foi adquirido no IDE-Sisema e no Cadastro Ambiental Rural, portal de consultas públicas.

Para realização do trabalho foi utilizado as camadas: representação das Áreas de Preservação Permanente (APPs) hídricas de Minas Gerais, na escala de 1:25000, disponibilizada pelo IDE-Sisema, que apresenta a classificação dos rios em até 10 m, 10 a 50m, 50 a 200m, 200 a 600m, acima de 600 m e reservatório artificial, com extensão das faixas a partir da borda do rio (30m, 50m, 100m, 200m, 500m); O uso e ocupação do solo, do ano de 2023, sendo representada por 4 classes (Área consolidada, área antropizada, vegetação 2008 e 2004), no estudo foi utilizado a camada de áreas antropizadas, também disponível pelo IDE-Sisema; O uso e cobertura do solo de 2023, desenvolvido pelo MapBiomas e adquirido pelo IDE-Sisema, apresenta escala de 1:100000, com presença de 16 classes na área de estudo; As áreas dos imóveis rurais presentes na base de dados do CAR, apresentando número de matrícula, situação e módulos fiscais.

2.3. ANÁLISE ESPACIAL

Com o download dos dados foi utilizado o software QGIS Long Term Release (LTR) – versão 3.40.6 'Bratislava', onde inicialmente os shapes tiveram geometria corrigida, reprojeção, e recorte de acordo com as camadas de interesse, utilizando as ferramentas disponíveis para vetorização. A Figura 2 apresenta os dados de interesse recortados.

Figura 2 – Camadas utilizadas nos distritos de Rural Minas e Unaí: (A) APPs hídricas, (B) Uso e cobertura de 2023, (C) Áreas antropizadas



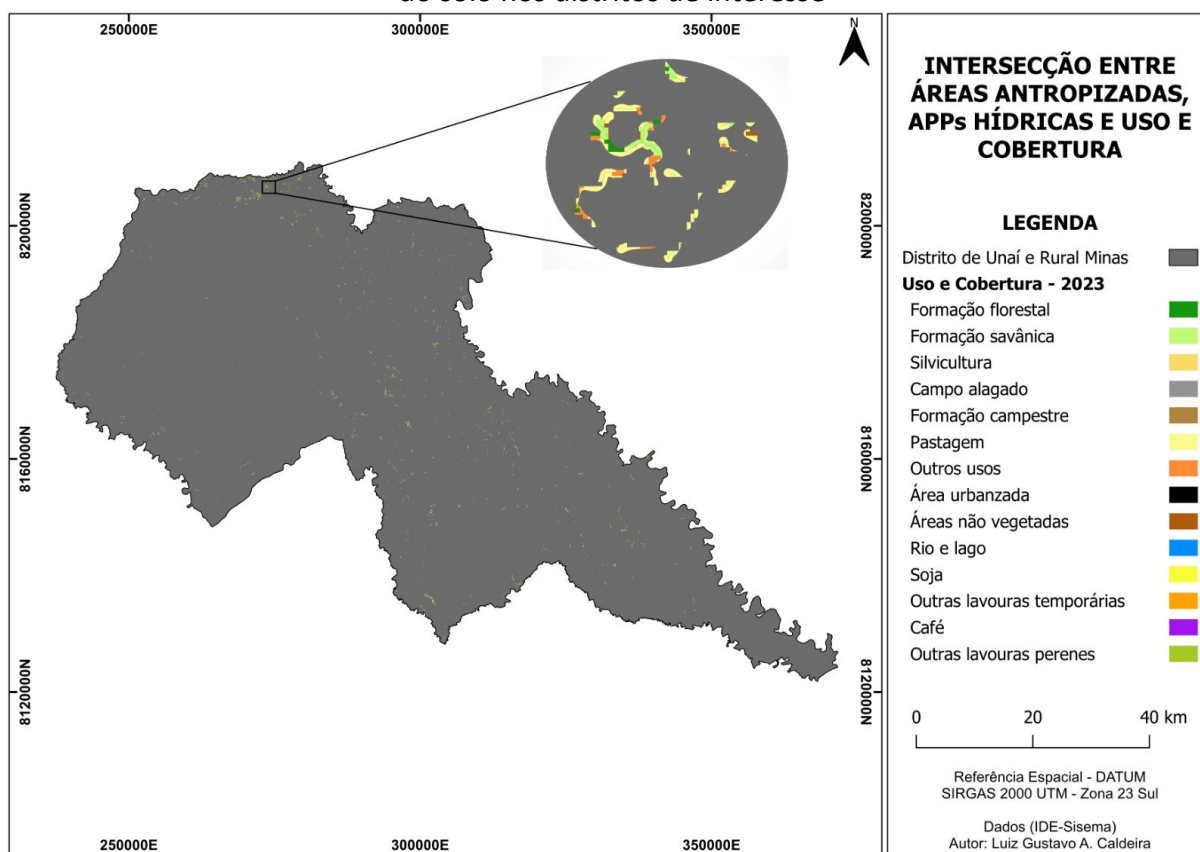
Fonte: Autoria própria.

O mapa A, é apresentado as APPs hídricas presentes dentro dos distritos de interesse. No mapa B, é classificado os diversos uso e cobertura da área, e o mapa C demostram as áreas antropizadas. Todos os shapes possuem como geometria polígono, permitindo a quantificação das áreas através da calculadora de campo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A identificação do uso e cobertura do solo em áreas antropizadas presentes sobre faixas de APPs hídricas foi possível através da intersecção dos dados apresentados anteriormente, gerando o mapa da Figura 3, permitindo a quantificação das classes de uso.

Figura 3 – Resultado da intersecção das áreas antropizadas, APPs hídricas e uso e cobertura do solo nos distritos de interesse



Fonte: Autoria própria.

O mapa apresenta em cinza a área dos distritos de Rural Minas e Unaí. O destaque está no mapa de detalhe, que amplia uma região específica auxiliando na visualização das informações almejadas. No mapa de detalhe, as áreas coloridas representam as intersecções das camadas analisadas, classificando a legenda de "Uso e Cobertura - 2023" (ex: formação florestal, pastagem, soja, áreas urbanizadas, etc.).

Com a classificação do uso e cobertura (Figura 3) foi realizado a quantificação das classes, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Quantificação das classes de uso e cobertura presente sobre faixas de APPs hídricas

Uso e cobertura	Área (ha)	Área (%)
Pastagem	795,69	49,54
Formação savânica	337,41	21,01
Outros usos	216,91	13,50
Formação florestal	154,14	9,60
Rio e lago	25,64	1,60
Outras lavouras temporárias	20,11	1,25
Soja	17,17	1,07
Formação campestre	15,77	0,98
Campo alagado	15,04	0,94
Áreas não vegetadas	4,03	0,25
Silvicultura	2,96	0,18
Café	0,83	0,05
Área urbanizada	0,39	0,02
Outras lavouras perenes	0,18	0,01

Fonte: Autoria própria.

A quantificação das áreas predominantes nas intersecções (Tabela 1) evidencia que a pastagem representa quase 50% do uso e cobertura do solo em áreas de APPs hídricas. Esse padrão de ocupação por pastagens em áreas ripárias é consistente com o observado em outras regiões do Brasil e do mundo, onde a expansão agropecuária tem sido o principal vetor de alteração da paisagem em zonas de amortecimento de corpos d'água. Conforme demonstrado por Stieger e McKenzie (2024), ecossistemas ripários estão entre os mais alterados por atividades humanas globalmente, com cerca de um terço das populações de peixes ameaçadas de extinção em decorrência da degradação desses habitats. A elevada proporção de pastagem sobre as APPs hídricas identificada no presente estudo (49,54%) reforça a necessidade de estratégias efetivas de planejamento e restauração dessas áreas, especialmente considerando que a fragmentação da paisagem ripária tende a se intensificar ao longo do tempo em resposta ao crescimento de superfícies impermeáveis e à conversão de áreas agrícolas.

Gavlak et al. (2025) evidenciaram que a vegetação nativa em áreas ripárias é essencial para a fertilidade do solo, influenciando positivamente os teores de matéria orgânica, fósforo, cálcio e pH, além de estar associada a melhores índices de qualidade da água. Em

contrapartida, áreas urbanizadas e com baixo teor de matéria orgânica apresentaram elevadas concentrações de alumínio e qualidade da água comprometida. A predominância de pastagem e formações savânicas sobre as APPs hídricas (totalizando 70,55% das áreas interseccionadas) sugere potenciais impactos negativos sobre a qualidade do solo e da água na região de Unaí, uma vez que a supressão da vegetação ripária nativa compromete a capacidade de filtragem de contaminantes e a manutenção da integridade dos ecossistemas aquáticos.

Correlacionando a Tabela 1 e a Tabela 2, que apresenta a quantificação das áreas antropizadas de acordo com a categoria das APPs hídricas.

Tabela 2 – Quantificação das áreas antropizadas de acordo com a categoria dos cursos hídricos

Classe	Categoria	Área (ha)	Área (%)
1	até 10 m	1387,66	86,17
2	entre 10 e 50 m	128,76	8,00
3	entre 50 e 200 m	18,40	1,14
4	reservatório	75,62	4,70

Fonte: Autoria própria.

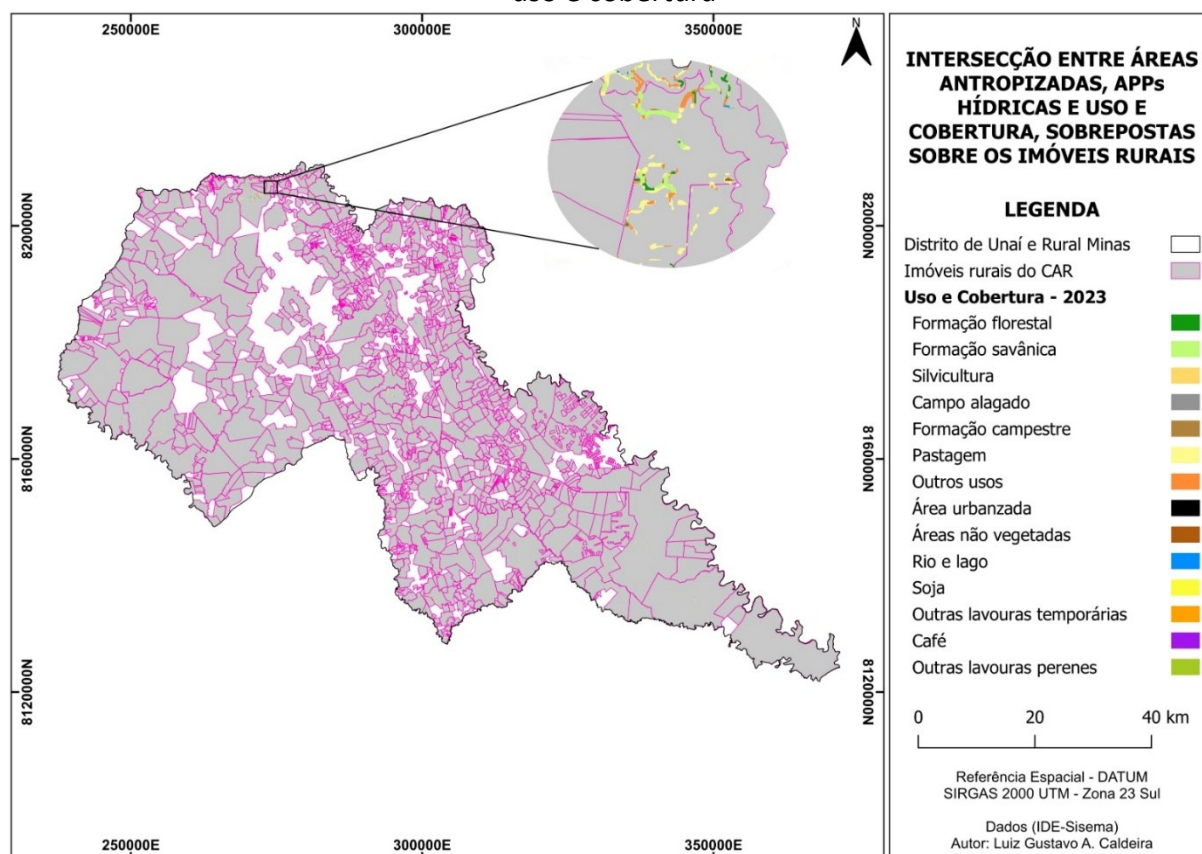
É possível verificar que 86,7% das áreas antropizadas estão no entorno de até 10 m dos cursos hídricos, apresentando grandes riscos à preservação e manutenção dos recursos naturais. Essa concentração de atividades antrópicas na faixa mais próxima aos corpos d'água é particularmente preocupante à luz dos achados de Xie et al. (2024), que demonstraram a importância da subdivisão da zona ripária com base em valores de serviços ecossistêmicos e riscos ecológicos da paisagem para o planejamento da conservação. A elevada ocupação na faixa de até 10 m indica que as faixas de amortecimento mais críticas para a proteção dos recursos hídricos estão sob pressão antrópica significativa, comprometendo funções ecossistêmicas fundamentais como a retenção de sedimentos, a filtragem de poluentes e a regulação do ciclo hidrológico.

Atesoglu et al. (2025), em estudo de monitoramento em larga escala de zonas ripárias na Turquia, observaram que o sensoriamento remoto e a observação da Terra permitem a detecção de mudanças na cobertura da terra em áreas ripárias, fornecendo subsídios para a gestão ambiental em escala regional. A abordagem adotada no presente estudo, utilizando dados do IDE-Sisema e do CAR em ambiente SIG, alinha-se com essa perspectiva metodológica

e demonstra a viabilidade de análises espaciais em larga escala para a identificação de conflitos de uso em APPs hídricas.

A disponibilização dos dados dos imóveis rurais, no CAR, permitiu a sobreposição das áreas antropizadas (Figura 3) nas áreas dos imóveis, auxiliando na identificação das propriedades (Figura 4).

Figura 4 – Imóveis rurais com áreas antropizadas em faixas de APPs hídricas, classificando o uso e cobertura



Fonte: Autoria própria.

A sobreposição dos dados de intersecção nas áreas dos imóveis rurais permite a identificação dos proprietários através do número de matrícula, auxiliando na gestão ambiental de órgãos públicos. Contudo, é importante considerar as limitações inerentes à base de dados do CAR. Conforme destacado por Matias et al. (2024), o CAR é um cadastro autodeclarado e, como a maior parte dos cadastros ainda não foi validada pelos órgãos ambientais competentes, esses dados podem apresentar inconsistências, tais como a sobreposição geométrica entre imóveis rurais, o que dificulta sua utilização em Sistemas de Informação Geográfica. Os autores propõem uma metodologia para análise e remoção de sobreposições a partir dos dados brutos do Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural

(SICAR), classificando os imóveis por tamanho conforme o módulo fiscal do município e estabelecendo hierarquias para atribuição de áreas sobrepostas. Essa abordagem metodológica é particularmente relevante para o presente estudo, uma vez que a confiabilidade da identificação dos imóveis em desacordo com a legislação depende da qualidade dos dados geoespaciais do CAR.

Adicionalmente, Borges et al. (2024) demonstraram a viabilidade da utilização de algoritmos de aprendizado de máquina para a classificação e identificação automatizada de registros espúrios no CAR, com modelos como Gradient Boosting alcançando métricas de avaliação acima de 90%. Essa abordagem poderia ser integrada à análise espacial para aumentar a confiabilidade dos dados do CAR e agilizar os processos de regularização ambiental no Brasil.

Os resultados do presente estudo também dialogam com as preocupações levantadas por Malama et al. (2024) sobre a interação entre águas subterrâneas e superficiais em áreas ripárias. Os autores desenvolveram modelos semi-analíticos para simular o rebaixamento transitório de cursos d'água em resposta à captação de aquíferos, demonstrando que o bombeamento de águas subterrâneas próximo a rios conectados pode induzir rebaixamento significativo do nível d'água. A ocupação antrópica intensiva nas faixas ripárias, especialmente na classe de até 10 m identificada no presente estudo, pode agravar esses efeitos ao reduzir a recarga dos aquíferos e comprometer a conectividade hidrológica entre os ecossistemas terrestres e aquáticos.

O estudo de Pal, Banerjee e Melnik (2023) sobre o papel da superfície do solo em ecossistemas semiáridos sustentáveis destaca a complexa interação entre recursos hídricos, vegetação e organismos vivos, evidenciando que padrões ecológicos em ecossistemas semiáridos afetam diretamente a biodiversidade e a resiliência ecossistêmica. A região de Unaí, caracterizada por clima tropical com inverno seco (Aw), insere-se nesse contexto, onde a manutenção da cobertura vegetal nas APPs hídricas é fundamental para a sustentabilidade dos sistemas produtivos e para a resiliência dos ecossistemas frente às variações climáticas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo atingiu seus objetivos ao identificar e quantificar as classes de uso e cobertura do solo em áreas antropizadas sobrepostas às APPs hídricas nos distritos de Rural Minas e Unaí, bem como ao relacionar essas ocorrências aos imóveis cadastrados no CAR. A

metodologia baseada em geoprocessamento mostrou-se eficaz para diagnosticar conflitos ambientais em escala local, permitindo a associação entre usos do solo, com destaque para atividades agropecuárias e faixas ripárias protegidas por lei, além de viabilizar a localização de propriedades potencialmente irregulares.

Os resultados obtidos reforçam a utilidade do CAR e das bases geoespaciais públicas como ferramentas de suporte à fiscalização e ao planejamento territorial, embora ressalvas quanto à consistência dos dados autodeclaratórios devam ser consideradas. A abordagem empregada contribui para a gestão ambiental ao subsidiar órgãos públicos, instituições financeiras e consultores na tomada de decisão, recomendando-se a incorporação de análises multi-temporais e de métricas de serviços ecossistêmicos em trabalhos futuros para ampliar o alcance e a efetividade das políticas de conservação de APPs hídricas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM, ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal – PPGPV e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo fomento à formação e à pesquisa científica.

REFERÊNCIAS

- Almeida, J. A. S. de, Júnior, V. de P. S., & Espindola, G. M. de. (2026). Land-Tenure Dynamics and Deforestation Pressure in MATOPIBA, Brazil: An Assessment of the Rural Environmental Registry (CAR), 2019–2025. **Land**, 15(5), 700. <https://doi.org/10.3390/land15050700>
- Atesoglu, A., Bulut, F.S., Ozel, H.B. et al. Large-scale earth observation and monitoring of riparian zone land-cover changes in Türkiye. **Int. J. Environ. Sci. Technol.** 22, 11843–11858 (2025). <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06399-0>
- Barasal Morales, A., Laurini, M. P., & Dou, Y. (2026). Unveiling Cerrado deforestation: A comparative analysis among Brazilian states. **Land Use Policy**, 167, 108062. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2026.108062>
- BRASIL. **Lei nº 12.651**, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, nº 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, e nº 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 28 maio 2012.

- Borges, Fernando E. M. Ferreira, Danton D. Junior, Antônio C. S. C. & Magalhães, Ricardo R. (2024, October 18). Automatic Identification of Spurious Records in the Rural Environmental Registry via Machine Learning. <https://doi.org/10.20906/CBA2024/4471>
- Chaves, L. A., Neves, S. M. A. da S., Pierangeli, M. A. P., Castrillon, S. K. I., & Kreitlow, J. P. (2023). Change in the protection regime of Permanent Preservation Areas in the 2012 Forest Code. **Ambiente & Sociedade**, 26. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20190211r2vu2023l1oa>
- Degaspari, I. A. M., Monteiro, D. C., Garcia, D. A., Brito, E. A. de, Gomedes, E., Schwertner, G., & Breda, G. D. (2025). Evaluation of Conservation Efficiency: Metrics for the Management of Permanent Preservation Areas and Legal Reserves in Brazil. **Sustainability**, 17(5), 1819. <https://doi.org/10.3390/su17051819>
- Durigan, G., Munhoz, C. B., Zakia, M. J. B., Oliveira, R. S., Pilon, N. A. L., Valle, R. S. T. do, Walter, B. M. T., Honda, E. A., & Pott, A. (2022). Cerrado wetlands: multiple ecosystems deserving legal protection as a unique and irreplaceable treasure. **Perspectives in Ecology and Conservation**, 20(3), 185–196. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2022.06.002>
- Dritsas, E., & Trigka, M. (2025). Remote Sensing and Geospatial Analysis in the Big Data Era: A Survey. **Remote Sensing**, 17(3), 550. <https://doi.org/10.3390/rs17030550>
- Fonseca, C. A. B. da, Al-Ansari, N., Silva, R. M. da, Santos, C. A. G., Zerouali, B., Oliveira, D. B. de, & Elbeltagi, A. (2022). Investigating Relationships between Runoff–Erosion Processes and Land Use and Land Cover Using Remote Sensing Multiple Gridded Datasets. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, 11(5), 272. <https://doi.org/10.3390/ijgi11050272>
- GAVLAK, G., OLIVEIRA FILHO, P. C., LOMBARDI, K. C., & MARTINS, K. G. (2025). Impacts of land use and occupation in riparian zones on water quality and soil fertility: a study in the Antas River, Irati-PR, Brazil. **Anais Da Academia Brasileira de Ciências**, 97(3). <https://doi.org/10.1590/0001-3765202520240042>
- Horn, C. (2024). The International and Local Politics of the Rural Environmental Registry: Brazil's Green Currency. **Development and Change**, 55(6), 1230–1258. <https://doi.org/10.1111/dech.12863>
- Machado Júnior, J., & Machado, R. B. (2025). Políticas públicas resultantes da mudança do Código Florestal: violação das Áreas de Preservação Permanentes e suas formas de intervenção. **Ciência Florestal**, e89396. <https://doi.org/10.5902/1980509889396>
- Malama, B., Lin, Y., & Kuhlman, K. L. (2024). Semi-Analytical Modeling of Transient Stream Drawdown and Depletion in Response to Aquifer Pumping. **Groundwater**, 62(6), 904–919. <https://doi.org/10.1111/gwat.13425>
- Matias, M. R., Milare, G., Escada, M. I. S., & Monteiro, A. M. V. (2024). As Geometrias do Cadastro Ambiental Rural (CAR): Uma Proposta Metodológica para Análise e Remoção

- da Sobreposição de Imóveis Rurais Declarados na Base de Dados do CAR. **Revista Brasileira de Cartografia**, 76. <https://doi.org/10.14393/rbcv76n0a-66995>
- Naime, U. J., et al. Solos e avaliação do potencial agrossilvipastoril das microrregiões Paracatu e Unaí - Minas Gerais. Belo Horizonte: **Epamig**, 2014., 2014. www.alice.cnptia.embrapa.br, <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1036511>.
- Paiva, A. P. C. Q. de, Lima, A. A. de, & Silva, D. N. e. (2021). The contribution of the rural environmental registry to family farmers in the state of Amazonas, Brazil. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, 12(11), 31–44. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.011.0004>
- Pal, Swadesh, et al. “The Role of Soil Surface in a Sustainable Semiarid Ecosystem”. **PLOS ONE**, organizado por Zeeshan Ahmad, v. 19, n. 12, dezembro de 2024, p. e0314910. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0314910>.
- Paula, D. S. de, Ortiz, J. de O., Rosim, S., & Namikawa, L. M. (2021). A METHODOLOGY FOR DETERMINING AND ANALYZING PERMANENT PROTECTION AREAS OF PROPERTIES DECLARED IN THE RURAL ENVIRONMENTAL REGISTER- CAR. **Boletim de Ciências Geodésicas**, 27(3). <https://doi.org/10.1590/s1982-21702021000300016>
- Silva, J. L. B. da, Silva, M. V. da, Lopes, P. M. O., Santos, R. C., Carvalho, A. A. de, Moura, G. B. de A., Silva, T. G. F. da, César Bezerra, A., Jardim, A. M. da R. F., Ferreira, M. B., Silva, P. C., Silva, J. A. O. S., Mesquita, M., Batista, P. H. D., Jordan, R. A., & Oliveira, H. F. E. de. (2025). Land Use and Land Cover Change Patterns from Orbital Remote Sensing Products: Spatial Dynamics and Trend Analysis in Northeastern Brazil. **Land**, 14(10), 1954. <https://doi.org/10.3390/land14101954>
- Stieger, M., Mckenzie, P. Riparian Landscape Change: A Spatial Approach for Quantifying Change and Development of a River Network Restoration Model. **Environmental Management** 74, 853–869 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00267-024-02025-w>
- Xie, Y., Zhu, Q., Bai, H., He, H., & Zhang, Y. (2024). Combining ecosystem service value and landscape ecological risk to subdivide the riparian buffer zone of the Weihe River in Shaanxi. **Ecological Indicators**, 166, 112424. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112424>

CAPÍTULO VI

GEOPROCESSAMENTO APLICADO AO ESTUDO DA EXPANSÃO CANAVIEIRA NO CERRADO SUL GOIANO ENTRE OS ANOS DE 2006, 2010 E 2014

SUGAR CANE EXPANSION IN THE CERRADO SOUTH GOIANO BETWEEN THE 2006 TO 2014

DOI: 10.51859/amplla.mac6200-6

Jordan Barbosa Lunas^{1,9}

Patricia Costa Silva²

Adriana Rodolfo da Costa³

Ana Paula Galvão Silva^{4,9}

Clarice Backes⁵

Divina Aparecida Leonel Lunas⁶

Maria Eduarda Oliveira Silva^{7,9}

Pedro Rogerio Giongo^{8,9}

¹ Engenheiro Agrícola, Universidade Estadual de Goiás -UEG, Santa Helena de Goiás

² Docente Adjunto do curso de Agronomia. Universidade Estadual de Goiás – UEG – Campus Quirinópolis.

³ Docente Adjunto do curso de Agronomia. Universidade Estadual de Goiás – UEG – Campus Quirinópolis.

⁴ UEG- PPGPAF - São Luís de Montes Belos

⁵ Mestranda em Pastagem e Forragicultura PPG PAF. Universidade Estadual de Goiás – UEG – Campus Oeste São Luís de Montes Belos, GO.

⁶ Docente Adjunto do curso de Economia. Universidade Estadual de Goiás – UEG – Campus Anápolis

⁷ Mestranda em Ambiente e Sociedade PPGAS. Universidade Estadual de Goiás – UEG – Campus Quirinópolis.

⁸ Docente Adjunto do curso de Agronomia. Universidade Estadual de Goiás – UEG – Campus Quirinópolis.

⁹ LAGE – Laboratório de Geotecnologias, Universidade Estadual de Goiás – UEG – Campus Quirinópolis

RESUMO

A expansão da cultura da cana-de-açúcar no estado de Goiás, associada aos conflitos pelo uso do solo e à competição com áreas destinadas à produção de alimentos, tem estimulado debates acadêmicos, científicos e políticos sobre a dinâmica de ocupação territorial dessa atividade agrícola. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo analisar e avaliar a expansão do setor sucroalcooleiro na mesorregião sul goiana entre os anos de 2006 e 2014. O banco de dados utilizado foi composto por arquivos geográficos contendo as áreas de cultivo de cana-de-açúcar disponibilizadas pelo projeto CANASAT/INPE, limites municipais da região sul de Goiás e imagens de satélite empregadas na caracterização e no mapeamento das áreas cultivadas. Para o processamento e análise espacial foram aplicadas técnicas de geoprocessamento em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica). Em Goiás foram identificadas 39 indústrias de

processamento de cana-de-açúcar, sendo 58% concentradas na região sul do estado. Em 2006, essa mesorregião era responsável por 57,36% da área cultivada com cana em Goiás. Entre 2006 e 2010 verificou-se crescimento de 217,12% da cultura. A partir da sobreposição dos arquivos espaciais foi calculado o percentual de ocupação da cana em cada município. Em 2014, os maiores percentuais foram observados em Porteirão (39%), Maurilândia (37%), Gouvelândia (34%) e Santa Helena de Goiás (33%), enquanto a média regional foi de 11,33%. Entre 2010 e 2014 ocorreu expansão de 339,53% das áreas cultivadas.

Palavras-chave: Uso do solo. expansão agrícola. cana-de-açúcar.

ABSTRACT

The sugarcane expansion, associated with conflicts over land use and competition with food production

areas, stimulates a wide academic, scientific and political discussion about the occupation of sugar cane. The main objective of the work was to present and evaluate the expansion of the sugar and alcohol sector in the southern mesoregion of the state of Goiás between the years 2006 to 2014. The database consisted of vector files acquired from CANASAT / INPE, for characterization and mapping of the areas cultivation techniques were used geoprocessing techniques with GIS (Geographic Information System). Subsequently, the percentage of occupation area for each municipality in the mesoregion was calculated. In Goiás, 39 sugarcane processing industries were identified, with 58% of these plants concentrated in the southern region of the state. In 2006, the southern region of Goiás was responsible for the cultivation of 57.36% of the total

state. Between 2006 and 2010 there was an increase of 217.12%. In 2014 the highest percentages of sugar cane occupation in relation to the total area of the municipality were identified in Porteirão (39%), Maurilândia (37%), Gouvelândia (34%) and Santa Helena de Goiás (33%), while the average percentage was 11.33%. Between 2010 and 2014 there was an increase of 339.53% in cultivated area. The geographical spatialization of the sugarcane areas indicates, firstly, an occupation located in the center of the southern region of Goiás, and later the movement towards the south and west, towards new areas for occupation.

Keywords: Land use. agricultural expansion. sugar cane.

1. INTRODUÇÃO

O geoprocessamento é uma disciplina que utiliza técnicas computacionais para descobrir, analisar, interpretar e representar dados geográficos. Ele se baseia em sistemas de informações geográficas (SIG) para manipular e visualizar dados espaciais. No contexto do estudo da expansão canavieira no Cerrado Sul Goiano entre os anos de 2006 a 2014, o geoprocessamento desempenha um papel crucial.

A expansão canavieira refere-se ao aumento da área destinada ao cultivo de cana-de-açúcar. Nesse contexto, o Cerrado Sul Goiano é uma região específica do Brasil, conhecida por seu bioma de cerrado e sua importância na produção agrícola, incluindo a produção de cana-de-açúcar (HALL, 2018).

A incerteza em relação à disponibilidade de combustíveis fósseis, associada às mudanças climáticas globais, impulsionou o surgimento e o desenvolvimento da economia de baixo carbono (LINNENLUECKE et al., 2019). Como resultado, vários países passaram a investir em fontes de energia renovável e mais sustentável. Nesse contexto nacional e internacional, surgiram novas fontes de energia, com destaque para os biocombustíveis, especialmente os derivados da cana-de-açúcar, desempenhando um papel significativo na nova matriz energética brasileira. No entanto, essa tendência impulsionou a lucratividade e expansão da produção de cana-de-açúcar em todo o território nacional (TEIXEIRA; COUTO, 2013; CALDARELI; GILIO et al., 2018).

No Brasil, o uso do etanol como combustível recebe amplo incentivo há décadas (SZWARK, 2016), promovendo o crescimento das indústrias e das áreas destinadas à produção

de cana-de-açúcar. O marco crucial para a produção de etanol no Brasil ocorreu na década de 1970, com políticas de incentivo, como o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), que posicionou o etanol como uma alternativa completa aos combustíveis fósseis (GRACCI; PEREIRA, 2019). Posteriormente, em 2003, a introdução dos veículos flex-fuel ampliou ainda mais o uso do etanol (SILVA; PASQUALETTO, 2015; CALDARELI; GILIO, 2018). O aumento da demanda nacional por álcool fez com que as destilarias e as áreas de cultivo de cana-de-açúcar se expandissem rapidamente por vários estados brasileiros.

O Estado de Goiás tornou-se atraente para o setor sucroenergético, principalmente devido à qualidade e disponibilidade de terras, com predominância de Latossolos ocupados por pastagens degradadas, condições climáticas desenvolvidas e preços de aquisição e aquisição de terras comparativamente mais baixos em comparação com regiões já consolidadas na produção de cana-de-açúcar (SPERA, VANWAY, MUSTARD, 2017). Além desses fatores, os investimentos públicos desempenharam um papel crucial na expansão da cana-de-açúcar para novas áreas (SILVA; PASQUALETTO, 2015). Conforme observado por Castro et al. (2010), a ocupação das áreas de cana-de-açúcar ocorreu principalmente em terras arrendadas e adquiridas por usinas e fornecedores iniciais dentro do raio de ação das indústrias, resultando em rápidas alterações da paisagem nessas regiões.

Mendonça, Pitta, Xavier (2013) destacam que, entre 2003 e 2011, os proprietários de usinas de etanol receberam aproximadamente R\$ 28,3 bilhões em empréstimos do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). Nos últimos anos, o Brasil tem estimulado a produção de biocombustíveis por meio de programas governamentais de incentivo, como o “RenovaBio”, com o objetivo de expandir o mercado de etanol (MME, 2017). Todos esses fatores incentivaram a intensificação do uso do solo para o cultivo de cana-de-açúcar em vários municípios goianos, principalmente a partir de 2003. Portanto, o estudo do crescimento regional da cana-de-açúcar entre os municípios goianos é uma abordagem importante para compreender a dinâmica de expansão do setor sucroalcooleiro (JUSTICE, 2022).

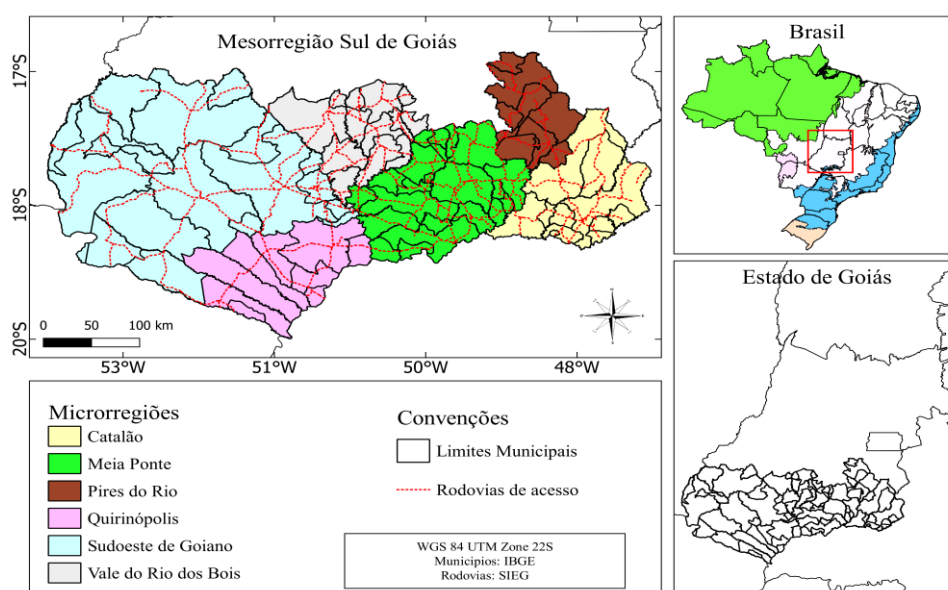
A rápida expansão das áreas de cana de açúcar, aliado a conflitos pelo uso do solo e competição com áreas de produção de alimentos, estimulam uma ampla discussão acadêmica, científica e política sobre a ocupação da cana-de-açúcar. Além disso, alguns municípios se tornaram dependentes economicamente das atividades relacionadas a produção sucroalcooleira. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi verificar a evolução

temporal e espacial das áreas ocupadas por cana-de-açúcar, bem como identificar os municípios que tem os maiores percentuais de ocupação com a cultura entre os anos de 2006 a 2014 na mesorregião do sul do estado de Goiás.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido na Mesorregião Sul Goiano, compreendendo 82 municípios com total de área territorial de aproximadamente 135.015 km² (IBGE, 2017) (Figura 1). O clima da região é caracterizado por duas estações, com invernos secos entre os meses de maio e setembro, e verões chuvosos entre outubro e abril. Segundo a classificação de Köppen, a região enquadra como tropical úmido de savana com inverno seco (Aw). Possui precipitação média anual em torno de 1500 mm, mal distribuída durante o ano conforme trabalho de (MORAES ET AL, 2019).

Figura 1: Mapa de localização da Mesorregião Sul Goiano e as microrregiões goianas divididas de acordo com IBGE



A base de dados do estudo consistiu na delimitação vetorial das áreas de produção de cana-de-açúcar adquirida por meio do mapeamento via imagens de satélite realizado pelo projeto CANASAT, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2019). Os dados do levantamento são arquivos do tipo vetorial que contém os limites e os valores numéricos das áreas ocupadas com cana-de-açúcar.

Para o estudo foram selecionados os anos de 2006, 2010 e 2014, período que representa o maior incremento de áreas com cana-de-açúcar e implantação de novas usinas

na região. Após a aquisição dos dados os arquivos foram importados para o SIG (Sistema de Informação Geográfica) QGIS v2.18 (2018), para as etapas de geoprocessamento. No ambiente SIG os arquivos vetoriais foram transformados e padronizados para o sistema de referência de coordenadas (SRC) WGS 84 e posteriormente recortados para o território de interesse do estudo. Após a delimitação, foi utilizada a calculadora de campo do SIG para cálculo das respectivas áreas de cana-de-açúcar para cada município nos anos de 2006, 2010 e 2014. Esse procedimento serviu para a elaboração de mapas de ocupação como também para apoio na identificação dos municípios que tem como atividade principal o segmento sucroalcooleiro.

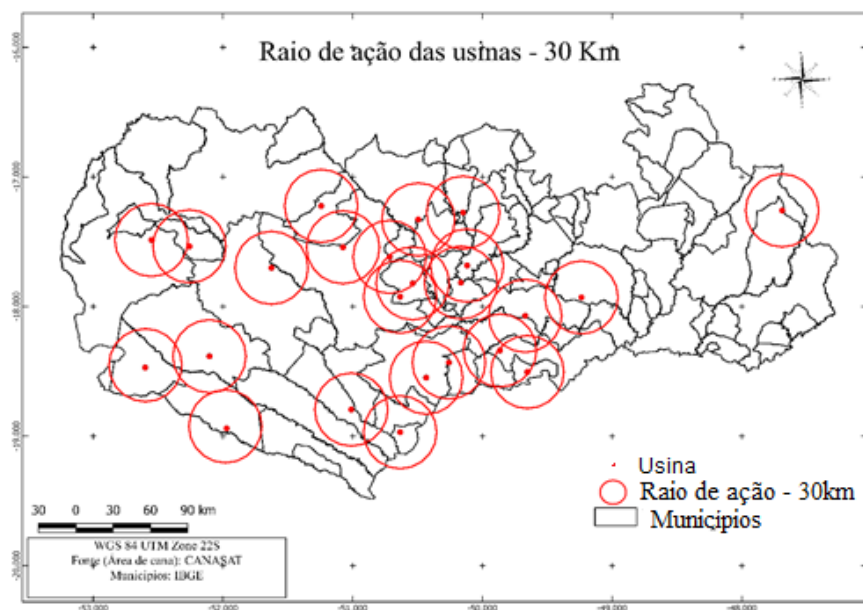
Para a localização e identificação das usinas utilizou a base de cadastro de usinas e destilarias do Sistema de Acompanhamento da Produção Canavieira (SAPCANA) do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2019). Foram gerados pontos geográficos com latitudes e longitudes das usinas com o apoio do Google Earth. Após esse procedimento foi gerado o raio de ação de 30 km de cada usina, conforme descrito em Castro et al. (2010), simulando um raio de ação das áreas cultivadas com cana, como matéria prima para a indústria.

Os resultados foram organizados e apresentados na forma de mapas temáticos, da área geográfica, extensão de cultivo e usinas sucro alcooleiras, além dos mapas temáticos com o percentual de área de cana em cada município para os anos de 2006, 2010 e 2014.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram identificadas 39 indústrias de processamento de cana-de-açúcar em Goiás, conforme dados da novaCana (2018). Deste total, 23 usinas estão distribuídas em 21 municípios na Mesorregião Sul Goiano, representando 58% das usinas localizadas na porção sul do estado (Figura 2). Devido à relação custo/benefício e à qualidade da matéria-prima, as áreas cultivadas com cana-de-açúcar concentram-se nas proximidades das indústrias, geralmente a uma distância de 30 a 40 km (MESQUITA; FURTADO, 2018). Assim, a implementação de cada nova unidade de processamento intensifica a pressão para a modificação do uso do solo na paisagem, evolui ao cultivo da cana-de-açúcar, conforme observado por Castro et al. (2010).

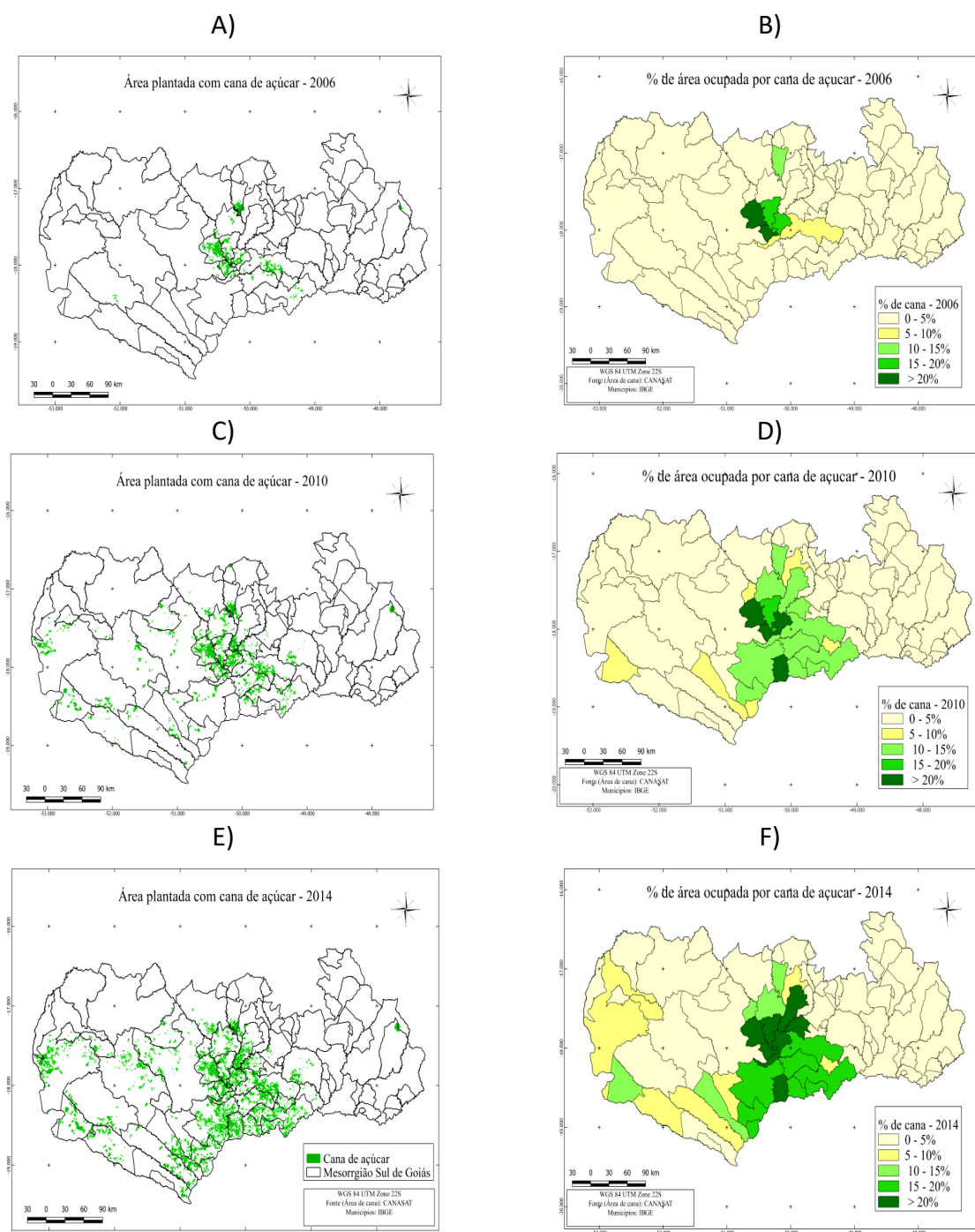
Figura 2: Localização geográfica das unidades de processamento sucroalcooleira e raio de ação para o cultivo de cana-de-açúcar, Mesorregião Sul Goiano, 2018.



No sul goiano, no ano de 2006 foram cultivados 136.272 ha de cana-de-açúcar, o que representa 57,36% do total da área cultivada no estado de Goiás. Observa-se a concentração das áreas na parte central da mesorregião sul goiana composta pelos municípios de Santa Helena de Goiás, Maurilândia, Turvelândia e Jandaia, esses municípios representaram um total de 40% de toda a área cultivada com a cultura no ano de 2006 na mesorregião sul (Figura 3A). Os maiores índices de ocupação de cana foram observados nos municípios de Santa Helena de Goiás e Maurilândia (Figura 3B), com ocupação superior a 20% da área total do município, esse alto índice de ocupação pode ser associado a principal atividade econômica e histórica de produção de cana-de-açúcar nesses municípios.

Entre as usinas que estão em operação nesses municípios tem a Vale do Verdão, instalada no município de Turvelândia, entorno de Maurilândia e Castelândia, entrou em funcionamento em 1982; Usina Santa Helena de Açúcar e Álcool, no município de Santa Helena de Goiás, em operação desde 1946 (SANTOS; ASSUNÇÃO, 2011).

Figura 3. Área de cultivo de cana-de-açúcar para os anos de 2006 (A), 2010 (C), 2014 (D), na mesorregião sul de Goiás e as porcentagem de ocupação de cana do território total de cada município para os anos de 2006 (B), 2010 (D), 2014 (E), na mesorregião sul de Goiás.



Em 2010, observou-se a expansão das áreas destinadas ao cultivo de cana-de-açúcar em duas áreas em Goiás. Uma delas ocorreu a partir do centro em direção ao sul da mesorregião, em uma fase mais acelerada, enquanto a outra tração foi mais lenta na direção oeste do estado, próxima à divisa com Mato Grosso e Mato Grosso do Sul (Figura 3C). Esse

movimento foi impulsionado pela implantação de novas usinas, principalmente entre 2006 e 2010. Naquele ano, o sul goiano foi responsável pelo cultivo de 432.154 hectares de cana-de-açúcar, representando 75,00% da área total do estado de Goiás (Figura 2C). Os municípios de Santa Helena de Goiás, Maurilândia, Turvelândia e Porteirão concentraram as maiores áreas de cultivo (Figura 3C), representando 19,16% de toda a área plantada na região sul de Goiás em 2010. Os municípios de Santa Helena de Goiás, Maurilândia e Porteirão apresentaram os maiores índices de ocupação em 2010, com mais de 20% da área total do município destinada ao cultivo de cana-de-açúcar (Figura 3D).

O aumento no cultivo de cana em 2010 foi motivado principalmente pela entrada de novas indústrias na região. A instalação de cerca de seis usinas sucroalcooleiras entre 2006 e 2010 foi incentivada pelas propostas do Plano Nacional de Agroenergia – PNA (BRASIL, 2006) e pela recuperação do mercado nacional do etanol, especialmente a partir de 2008 (MESQUITA, 2019). Nesse período, novas áreas de cultivo foram expandidas, associadas à narrativa de recuperação de pastagens degradadas, resultando na reorganização territorial e econômica de alguns municípios (SOARES et al., 2019a).

Em 2014, uma cana-de-açúcar ocupava uma área de 894.843 hectares em Goiás, sendo que 79,37% dessa área estavam treinados na mesorregião sul (Figura 3E). A cana-de-açúcar estava consolidada nas microrregiões de Quirinópolis, Meia Ponte e Sudoeste Goiano. Os municípios de Santa Helena de Goiás, Maurilândia, Turvelândia, Porteirão, Castelândia, Edéia, Gouvelândia e Vicentinópolis concentraram-se como as maiores áreas de cultivo em 2014, representando 19,16% de toda a área plantada na região sul de Goiás. Santa Helena de Goiás, Maurilândia e Porteirão apresentaram os maiores índices de ocupação em 2014, com mais de 20% da área total do município destinada ao cultivo de cana-de-açúcar (Figura 3F).

Em 2014, foram identificados 46 municípios no sul de Goiás com cultivo de cana-de-açúcar, sendo que alguns se destacaram por possuírem grandes percentuais de ocupação (Figura 3E). O município de Porteirão foi estimado com uma ocupação de 39% de sua área por cana-de-açúcar, seguido por Maurilândia com 37%, Gouvelândia com 34%, Santa Helena de Goiás com cerca de 33%. Esses quatro municípios foram os que atingiram índices superiores a 30%. O percentual médio para toda a mesorregião sul de Goiás em 2014 foi de 11,33%.

A possibilidade do uso de alta tecnologia e elevada lucratividade para a indústria canavieira na mesorregião sul do estado de Goiás tornou-se atrativa a esse segmento. As novas áreas de cultivo da cana-de-açúcar ocorreram preferencialmente em áreas de

pastagens degradadas como exemplo a transformação da paisagem no municio de Quirinópolis, GO relatada por (SILVA et al. 2019B), mas há relatos de substituição de culturas tradicionais como a soja e milho, bem como em áreas ocupadas pelo Cerrado (SILVA; MIZIARA, 2011). Destaca ainda que a expansão da cana em Goiás fez surgir uma competição pela renda da terra entre produtores de grãos e cultivo de cana-de-açúcar (SOARES et al. 2019a).

4. CONCLUSÕES

Nos anos de 2006 a 2010 o cultivo de cana de açúcar apresenta um crescimento de 217,12%, entre 2010 a 2014 o crescimento é de 339,53%. Esses números indicam um rápido crescimento da cultura na meso região sul de Goiás.

Os municípios que apresentam os maiores percentuais de ocupação com cana de açúcar são Porteirão, Maurilândia, Gouvelândia, e Santa Helena de Goiás, com ocupação de 39, 37, 34 e 33%, respectivamente, enquanto que o percentual médio é de 11,33% em 2014.

A espacialização geográfica das áreas de cana-de-açúcar indica, inicio de ocupação no centro da mesorregião sul goiana, e posteriormente expandem em direção ao sul e oeste.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio institucional da Universidade Estadual de Goiás, por meio de aquisição de equipamentos e custeio do Edital UEG Nº 05/2021 pró-projetos 2021 (SEI 202100020013910), Edital UEG Nº 22/2022 Pró-projetos 2022 (SEI 202200020022752); Edital UEG Nº 52/2023, Projeto de Encomenda Externa (SEI 202300020023055); Edital UEG Nº 20/2023, pró-projetos 2023 Segurança Hídrica (SEI 202300020023352).

REFERÊNCIAS

- ALVES, J. M. Paradigma técnico e co-geração de energia com bagaço de cana de açúcar em Goiás. **Agrener**, n. 6, 2006.
- BRASIL. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Produção e Agroenergia. Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011**. 2. ed. rev. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2006.
- BARBALHO, S. G. M.; SILVA, A. A.; CASTRO, S. S. A expansão da área de cultivo da cana-de-açúcar na região sul do estado de Goiás de 2001 a 2011. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n.29, Anápolis, 2013.

- BEHAINE, S. J. J. **Análise de fatores condicionantes da decisão de implantação de usinas sucroalcooleiras no estado de Minas Gerais**. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, 2012.
- CALDARELI, C. E.; GILIO, L.. Expansion of the sugarcane industry and its effects on land use in São Paulo: Analysis from 2000 through 2015. **Land Use Policy**. v. 76, p. 264-274, 2018
- CASTRO, S. S. de et al. Estudo da expansão da cana-de-açúcar no Estado de Goiás: subsídios para uma avaliação do potencial de impactos ambientais. In: FÓRUM DE CIÊNCIA & TECNOLOGIA NO CERRADO, 2., Goiânia. **Anais...** Goiânia: SBPC, 2007. p. 9-17, 2007.
- CASTRO, S. S.; KLAUS, A.; SILVA, A. A.; BORGES, V.. A expansão da cana-de-açúcar no cerrado e no estado de Goiás: elementos para uma análise espacial do processo. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 30, n. 1, p.171-191, 2010.
- CAVALLARI, R. L; TAMAE, R Y; ROSA, A. J. A importância de um sistema de informações geográficas no estudo de microbacias hidrográficas. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, Garça São Paulo, n. 11, p. 2, 2007.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, v.5, n.1, 2018.
- FRANCO, Í. O.; ASSUNÇÃO, H. F. Usos do solo no advento do agronegócio da cana-de- açúcar no sudoeste de Goiás estudo de caso do município de Jataí. **Ciência e Cultura**. v. 63, n.3, p. 33-36, São Paulo, Jul. 2011.
- GIONGO, P. R., SANTOS, D. DE M., NEVES, T. M. G. DE M., COSTA, A. R. DA, SILVA, P. C., & TAVEIRA, J. H. DA S. Remote sensing and geostatistics applied to NDVI, Kc and productive parameters in irrigated corn crop. **Irriga**, v.28, p.535–544. 2023.
- GIONGO, P. R., BARBOSA DE MORAIS, K. C., SILVA, M. V. DA, SANTOS, A. J. M., BACKES, C., RIBON, A. A., & PANDORFI, H. Chemical and granulometric characterization of soil and its influence on the bromatologic composition of pastures in savannah region, Central Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v.114, p.103703–103714. 2022.
- GOES, T; MARRA, R; SILVA, G. S. e. Setor sucroalcooleiro no Brasil Situação atual e perspectivas. **Poder Agrícola**, n. 2, p. 34, 2008.
- GRASSI; M. C. B.; PEREIRA, G. Energy-cane and RenovaBio: Brazilian vectors to boost the development of Biofuels. **Industrial Crops and Products**, v. 129, p. 201-205, March 2019.
- HALL, O. Remote Sensing of Yields: Application of UAV Imagery-Derived NDVI for Estimating Maize Vigor and Yields in Complex Farming Systems in Sub-Saharan Africa. **Drones**, 2, 28, 2018

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de pedologia**, ed. 2, n. 4, Rio de Janeiro, 2007.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Área dos Municípios censo 2017**. 2017. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos-municipios.html?t=acesso-ao-produto&c=52>>. Acesso em 22 de Agosto de 2018.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Monitoramento da Cana-de-açúcar via imagens de satélites**. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/cultivo.html>>. Acesso em 20 de janeiro de 2019.

JUSTICE, C. O. NASA Harvest (ing) **Earth Observations for Informed Agricultural Decisions**. In IGARSS 2020-2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 3706-3708). IEEE, 2020.

KOHLHEPP, G. **Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil**. Estudos Avançados, n. 24, p. 230, 2010.

LIMA, D. A. L. L. **Estrutura e Expansão da Agroindústria Canavieira no Sudoeste Goiano: Impactos no Uso do Solo e na Estrutura Fundiária a partir de 1990**. 261p. Tese. (Doutorado em Desenvolvimento Econômico). Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

LINNENLUECKE, M. K.; HAN, J.; ZHEYAO, P.; SMITH, T.. How markets will drive the transition to a low carbon economy. **Economic Modelling**, v. 77, p. 42-54, 2019.

MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2019). **SAPCANA- Sistema de Acompanhamento da Produção Canavieira**. Disponível em: <http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sapcana/downloadBaseCompletaInstituicao.action>. Acessado em: 03 de abril de 2023

MENDONÇA, M. L.; PITTA, F. T.; XAVIER, C. V.. **The Sugarcane Industry and the global economic crisis**. Transnational Institute and the Network for Social Justice and Human Rights, TNI Agrarian Justice Programme, 2013. Disponível em: <https://www.tni.org/en/publication/the-sugarcane-industry-and-the-global-economic-crisis>

MESQUITA, F. C. CASTILLO, R. A. Técnica e política na agricultura globalizada: expansão do setor sucroenergético em Goiás. **Revista Geosp – Espaço e Tempo** (Online), v. 23, n. 2, p. 285-306, ago. 2023

MESQUITA, F. C.; FURTADO, A. T. Globalização e relações territoriais na agricultura: particularidades na expansão da soja e da cana-de-açúcar no Estado de Goiás. **GEOgraphia** Niterói, v. 20, n. 43, p. 71-85, Mai./Ago. 2023

- MORAES, M. A. F. D. de. As profundas mudanças institucionais ao longo da história da agroindústria canavieira e os desafios atuais. **Economia Aplicada**, São Paulo, v.11, n. 4, p.555, 2007.
- NOVACANA. novaCana. **Usinas de açúcar e álcool no estado Goiás**. Paraná, 2015. Disponível em: <https://www.novacana.com/usinas_brasil/estados/goias>. Acesso em 20 de Agosto de 2013
- PAZINI, D. L. G; MONTANHA, E. P. **Geoprocessamento no ensino fundamental: utilizando SIG no ensino de geografia para alunos de 5.a a 8.a série**. Simpósio Sensoriamento Remoto XII, Goiânia, p. 1331, 2005.
- RIBEIRO, C. A. A. S. et al. Sistema de Informações Geográficas. **Princípios em Agricultura de Precisão**, p. 387, s/ano.
- STAUT, L. A. **Condições dos solos para o cultivo de cana-de-açúcar**. Dourados, 2006. Disponível em: <http://www.infobibos.com/artigos/2006_2/canasolo/index.htm>. Acesso em 15 de Novembro de 2018.
- SIFAEG – Sindicato da Indústria de Fabricação de Etanol do Estado de Goiás. **Números do Setor**. Goiânia, s/ano. Disponível em: < <http://www.sifaeg.com.br/numeros-do-setor/>> . Acesso em 18 de Agosto de 2018.
- SPERA, T. S. et al. Características físicas de um latossolo vermelho-escuro no cerrado de planaltina, DF, submetido á ação do fogo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.35, n.9, p.1817-1824, 2000.
- SZWARC, A.. Abastecimento, meio ambiente e desenvolvimento: Desenvolvimento e inovação tecnológica. **AgroANALYSIS**. v. 36, n. 5, p. 42, 2016.
- SILVA, L. I.; Leão, C.; PASQUALETTO, A. Área de ocupação da cana-de-açúcar no Estado de Goiás e o efeito substituição em relação a outras culturas de abastecimento Alimentar (2003-2012). **Revista Brasileira de Assuntos Regionais e Urbanos**. v. 1, n. 1, p. 21-35, 2015.
- SOARES, F. U.; GONÇALVES, R. J. A. F.; SPECIAN, V. **A territorialização do monopólio capitalista canavieiro em Goiás, Brasil**. **Estudos Geográficos: Revista Eletrônica de Geografia**, v. 17, edição especial, p. 93-105, 2019a.
- SPERA, S.; VANWEY, L.; MUSTARD, J.. The drivers of sugarcane expansion in Goiás, Brazil. **Land Use Policy**. v. 66, p. 111-119, 2017.
- SILVA, A. A.; MIZIARA, F. **Avanço do setor sucroalcooleiro e expansão da fronteira agrícola em Goiás**. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 399-407, jul./set. 2011.

TEIXEIRA, R. o A.; COUTO, M. S. D. da S.. **Análise dos impactos socioeconômicos e ambientais da expansão da cana-de-açúcar na Bacia do Rio Meia Ponte, Goiás.** Terceiro Incluído - NUPEAT–IESA–UFG, v. 3, n. 1, p. 128–143, 2013.

TSUKADA, C. Y. P. de S. **Os efeitos da expansão do setor sucroalcooleiro sobre o desenvolvimento de municípios da região administrativa de Marília-SP.** Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista – Presidente Prudente, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2011.

UNICA. União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **PIB do setor sucroenergético gerou mais de R\$113 bilhões em 2015.** São Paulo, 2015.

UNICA. União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Produção e área cultivada com cana-de-açúcar.** São Paulo, s/ano. Disponível em: < <http://www.unicadata.com.br/historico-de-area-ibge.php?idMn=33&tipoHistorico=5> > . Acesso em 20 de Agosto de 2018.

UNICANA. Associação dos Região de Bebedouro. **Falta de mão de obra para trabalho nas usinas.** s/ano.

CAPÍTULO VII

AGRICULTURA DE PRECISÃO E SENSORIAMENTO REMOTO SOB PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E PRODUTIVIDADE NA CULTURA DA SOJA

PRECISION AGRICULTURE AND REMOTE SENSING UNDER PHYSICOCHEMICAL PARAMETERS AND PRODUCTIVITY IN SOYBEAN CULTIVATION

DOI: 10.51859/amplla.mac6200-7

Pedro Rogerio Giongo^{1,8}

Vinícius Tavares De Araujo²

Janderson do Carmo Lima³

Jose Henrique da Silva Taveira⁴

Ana Paula Galvão Silva^{5,8}

Indomar Lopes de Moraes Filho^{6,8}

Alessandro Jose Marques Santos⁷

¹ Docente Adjunto do curso de Agronomia. Universidade Estadual de Goiás – UEG – Campus Quirinópolis.

² Especialista em Gestão do Agronegócio e suas Tecnologias. Universidade Estadual de Goiás – UEG – Santa Helena de Goiás.

³ Professor Adjunto do curso de Agronomia. Universidade Estadual de Goiás – UEG – Campus Nordeste, UnU Posse.

⁴ Docente Adjunto do curso de Agronomia. Universidade Estadual de Goiás – UEG – Campus Quirinópolis.

⁵ Mestranda em Pastagem e Forragicultura PPG PAF. Universidade Estadual de Goiás – UEG – Campus Oeste São Luís de Montes Belos, GO.

⁶ Mestrando em Ambiente e Sociedade PPGAS. Universidade Estadual de Goiás – UEG – Campus Quirinópolis.

⁷ Docente Adjunto do curso de Zootecnia. Universidade Estadual de Goiás – UEG – Campus Oeste São Luís de Montes Belos, GO.

⁸ LAGE – Laboratório de Geotecnologias, Universidade Estadual de Goiás – UEG – Campus Quirinópolis

RESUMO

Objetivou-se avaliar os parâmetros físico-químicos de solo e índice de vegetação na produtividade da cultura da soja safra 2017/2018, em uma área agrícola de 53,4 hectares (ha), no município de Santa Helena de Goiás – GO. Utilizou-se a cultivar INT 6300 RR, com semeadura realizada em espaçamento de 0,5 m entre linhas, e população de 300.000 plantas por ha. O grid amostral utilizado foi de 1 (uma) amostra para cada 3 hectares, a profundidade de 20 cm e os elementos considerados foram, a Altimetria, Argila, Matéria Orgânica, Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Saturação por Bases, pH, Saturação por Alumínio, Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Enxofre, Fósforo (P), Potássio (K), Enxofre (S), Boro (B), gerando por interpolação dos resultados, os mapas de recomendação para Calcário, P e K, através do sistema FieldView™, com imagens dos satélites obtidas por meio da ferramenta Land Viewer, selecionando as imagens com dia de passagem,

órbita/ponto e satélite, 27 de novembro de 2017 (223/72) Landsat 8 (30 DAP), 19 de dezembro de 2017 (22KEF) Sentinel 2A (52DAP) e 23 de janeiro de 2018 (222/72) Landsat 8 (87 DAP). Desta forma concluiu-se que as regiões de maior altitude foram as que tiveram maiores índices de NVDI e produtividade; regiões com maiores teores de Matéria Orgânica e Cálcio tiveram maiores índices de NDVI e produtividade do que as que receberam maiores quantidades de Calcário, P e K; na fase inicial a cultura apresentou baixos valores de NDVI e aos 87 DAP tem-se o pico dos valores de NDVI e baixa dispersão.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Sensoriamento Remoto. NVDI. *Glycine max* (L).

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the physical and chemical parameters of soil and vegetation index in the yield of soybean crop



2017/2018, in an agricultural area of 53.4 hectares (ha), in the municipality of Santa Helena de Goiás - GO. The cultivar INT 6300 RR was used, with sowing performed at a spacing of 0.5 m between rows, and a population of 300,000 plants per ha. The sample grid used was 1 (one) sample for each 3 hectares, the depth of 20 cm and the elements considered were Altimetry, Clay, Organic Matter, Cation Exchange Capacity (CTE), Base Saturation, pH, Saturation (P), Potassium (K), Sulfur (S), Boron (B), yielding by interpolation of the results, the recommendation maps for Limestone, P, and Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Sulfur, Phosphorus K, through the FieldView™ system, with images of satellites obtained using the Land Viewer tool, selecting images with day of passage, orbit / point

and satellite, November 27, 2017 (223/72) Landsat 8 (30 DAP) , December 19, 2017 (22KEF) Sentinel 2A (52DAP) and January 23, 2018 (222/72) Landsat 8 (87 DAP). Thus, it was concluded that the regions with higher altitude were those that had higher rates of NVDI and productivity; regions with higher levels of organic matter and calcium had higher rates of NDVI and productivity than those that received higher quantities of limestone, P and K; in the initial phase the culture had low values of NDVI and at 85 DAP one has the peak of value of NDVI and low dispersion.

Keywords: Precision agriculture. Remote sensing. NVIDIA. *Glycine max* (L).

1. INTRODUÇÃO

Atualmente existe a necessidade do aumento da eficiência da agricultura para manter a competitividade. Com a evolução da informática, tecnologias em geoprocessamento, sistemas de posicionamento global e muitas outras tecnologias foi possível proporcionar à agricultura uma nova forma de visualizar a propriedade. Com isso passou-se a entender que a propriedade não é homogênea e sim com partes individuais, conforme as suas necessidades, fazendo com que o produtor tenha o conhecimento detalhado em cada parte da linha de produção ou cada metro quadrado da sua propriedade (Sousa & Giongo, 2022).

A agricultura de precisão é uma filosofia de gerenciamento agrícola que parte de informações exatas e precisas constituindo-se como uma maneira de gerir um campo produtivo metro a metro, levando em conta o fato de que cada pedaço da fazenda tem propriedades diferentes (Roza, 2000).

Pelo sensoriamento remoto (SR) obtém-se informações de um objeto sem existir um contato físico com o mesmo, normalmente à longa distâncias. As primeiras medições por SR foram realizadas através de câmeras acopladas em aeronaves, balões, pipas, foguetes e até pássaros. Atualmente, imagens de sensores remotos podem ser obtidas a partir de diversas plataformas, como satélites, aeronaves, veículos aéreos não tripulados (VANTs), máquinas agrícolas autopropelidas, entre outros. Também existem outras aplicações para o SR, dentre elas, se destacam: (a) a estimativa da biomassa e produtividade da cultura; (b) o monitoramento de estresse hídrico e do vigor nas plantas e (c) a avaliação do estágio fenológico (Brandão, 2008).

Objetivou-se com este trabalho avaliar os parâmetros físico-químicos de solo, índice de vegetação e suas influências na produtividade da cultura da soja safra 2017/2018.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. AGRICULTURA DE PRECISÃO

Segundo Stafford (1999), a Agricultura de Precisão (AP) é um sistema de gerenciamento que leva em consideração a variabilidade espacial que existe dentro de uma área de produção, independentemente de seu tamanho, a agricultura de precisão trata de maneira localizada essa variabilidade corrigindo essas variações espaciais tanto em qualidade quanto em quantidade, o que aumenta consideravelmente o rendimento da produção.

De acordo com Epiphanyo (2017) a agricultura brasileira sustenta níveis positivos na balança comercial, sendo também, a atividade responsável por grande parte do desempenho da economia nacional. A agropecuária passou a ter que responder à demanda do aumento populacional, em um ambiente cada vez mais competitivo e restrito, para que isso acontecesse, o avanço tecnológico e científico, associado aos aspectos de logística, gerenciamento, empreendedorismo dentre outros, devem ser contínuos, principalmente num mundo competitivo e globalizado.

Estudos internacionais verificaram que até o ano de 2050, será necessário duplicar a produção agrícola para atender à necessidade de sustentabilidade, oferta de alimento para a população, e de governança, e também será necessário que as atividades agrícolas sejam cada vez mais sustentáveis, (Foley *et al.*, 2011).

Narvaez *et al.* (2017), também observaram a necessidade de dobrar a produção agrícola até 2050 em função do crescimento populacional, e a Agricultura de Precisão é uma ótima ferramenta para melhorar a eficiência da utilização dos insumos agrícolas e aumentar a produtividade, auxiliando no alcance desta meta sob os vários desafios encontrados na agricultura, especialmente, em virtude do aumento dos custos, degradação da terra, terras agricultáveis disponíveis, mudanças climáticas, e pouca mão-de-obra.

Entre os benefícios da aplicação da Agricultura de Precisão estão a sustentabilidade, através do uso mais racional dos insumos, principalmente fertilizantes e corretivos de solo, o que beneficia a proteção ambiental, segurança alimentar, através da maior oferta de alimentos, aumento da produtividade e da rentabilidade, produzindo mais na mesma área com menores custos, desenvolvimento econômico rural, através da demanda de mão-de-obra

especializada, maior qualidade dos produtos e maior qualidade de vida (Shiratsuchi *et al.*, 2014). A AP possui técnicas modernas ligadas à tecnologia de informação para que se possa melhor analisar as informações da atividade desenvolvida.

Segundo Shiratsuchi *et al.* (2014) o Sensoriamento Remoto (SR) possui um importante papel para que se possa obter as melhores informações a nível de campo, como, avaliação nutricional, demanda hídrica das culturas, informações meteorológicas, ataque de doenças e pragas, e a expectativa de produtividade, para isso, a AP utiliza sofisticadas tecnologias, como os sistemas de aplicações em taxa variável, onde é possível aplicar, em função da variabilidade espacial a quantidade necessária de insumos.

Uma das técnicas utilizadas na Agricultura de Precisão é o Sensoriamento Remoto, no qual, há a obtenção de informações da lavoura por meio de sensores que emitem e absorvem determinados comprimentos de ondas eletromagnéticas, o que torna possível calcular os índices de vegetação, utilizados para estimar as condições de desenvolvimento da cultura, entre outras aplicações, sem que ocorra contato físico (Zerbato *et al.*, 2016).

2.2. SENSORIAMENTO REMOTO (SR)

Segundo Florenzano (2011), a história do SR esteve ligada ao uso militar, sendo utilizado nas duas grandes guerras, na primeira através de fotografias aéreas para a identificação de alvos inimigos, já na segunda grande guerra, já se utilizava ondas na faixa do infravermelho para quebrar a camuflagem de alvos pintados de verde em meio ao verde da vegetação. Desde a década de 1970 o SR tem sido estudado (Formaggio & Sanches, 2017), a tecnologia de satélites possibilitou inúmeras aplicações em áreas agropecuárias como citado por diferentes autores (Sousa & Giongo, 2022; Giongo *et al.* 2022, Silva *et al.* 2025, Magalhães *et al.* 2026).

O Brasil é um dos países mais desenvolvidos do hemisfério sul no desenvolvimento de geotecnologias, sendo o SR utilizado a nível nacional. O INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) é o responsável pela expansão da tecnologia pelo território nacional (Formaggio e Sanches, 2017).

O SR é a medida da radiação eletromagnética absorvida ou refletida pelos alvos que estão na superfície terrestre, que possa ser tratada, interpretada e transformada em informação (Moreira, 2011).

Para Mobley (1994), o sol é a principal fonte de radiação eletromagnética utilizada para o SR da superfície da Terra. Essa energia é produzida através do ciclo próton-próton, onde quatro moléculas de hidrogênio são transformadas em um átomo de hélio e energia na forma de neutrinos e fótons. Segundo Novo (2008) neutrinos e fótons possuem comprimento de onda na faixa de raios gama, e são altamente energéticos, essa energia é sucessivamente absorvida pela matéria, reemitida e espalhada pela superfície do sol, ocorrendo perda de energia dessas partículas que se transformam em radiação infravermelha visível, quando deixam a superfície do Sol em direção ao espaço.

O conjunto de comprimento de ondas é o que caracteriza o espectro eletromagnético, considerando desde os raios gama até às ondas de rádio, os comprimentos de onda captadas pelos sensores são os do infravermelho próximo e do visível. Os comprimentos de ondas na faixa do raio X, raio ultravioleta e raio gama não interferem nos dados obtidos pelo SR, devido a opacidade da atmosfera, não sendo estes transmitidos (Novo, 2008).

Ao ser transmitida pelo Sol, ou por sistemas ativos de sensores em direção ao alvo, a radiação eletromagnética pode ser, transmitida, absorvida e refletida, na agricultura as faixas de onda mais utilizadas são do infravermelho próximo e do visível (Giongo *et al*, 2023).

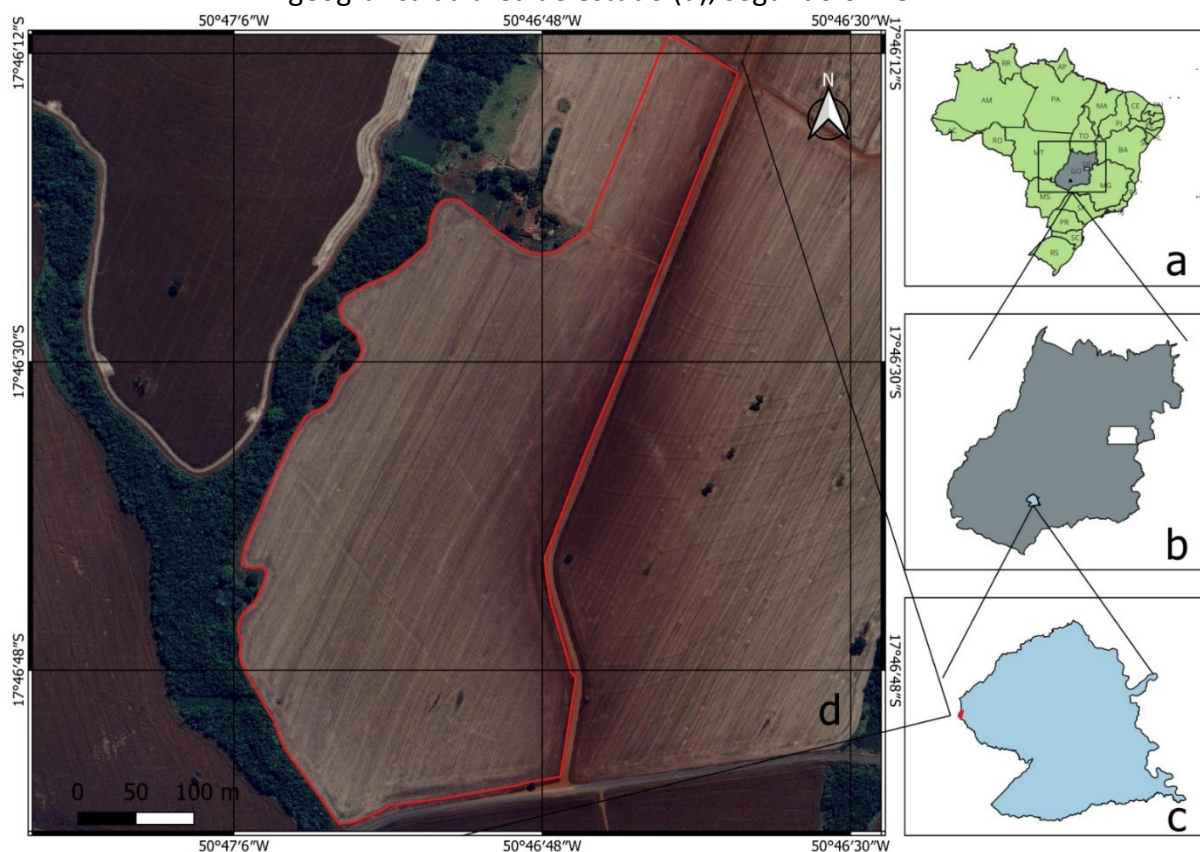
3. OBJETIVOS

Avaliar os parâmetros físico-químicos de solo, índice de vegetação e suas influências na produtividade da cultura da soja safra 2017/2018.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os estudos foram realizados na safra 2017/2018 em uma área agrícola de 53,4 ha no município de Santa Helena de Goiás – GO (Figura 1), as coordenadas geográficas do centro da área são 17°46'35,35''S e 50°46'53,49''O, e elevação de 684 m acima no nível médio do mar. O solo é considerado Latossolo Vermelho de acordo com a classificação da Santos *et al*. (2003), e o clima é considerado Aw, tropical com verão chuvoso, segundo köppen (1936).

Figura 3: Mapa do Brasil (a), Estado de Goiás (b), região de Santa Helena (c) e localização geográfica da área de estudo (d), segundo o IBGE.



Fonte: Autoria própria

A cultura estudada foi a Soja (*Glycine max*), com semeadura realizada em espaçamento de 0,5 m entre linhas, no dia 28/10/2017 e colheita realizada nos dias 23 e 24/02/2018, a cultivar avaliada foi a INT 6300 rr, a população de plantas foi de 300.000 plantas por hectare.

Os trabalhos de amostragem de solo, construção dos mapas de fertilidade assim como os mapas de recomendação, foram realizados por uma empresa privada contratada pelo proprietário do empreendimento e integram o banco de dados do sistema de gestão da empresa-rural. O grid amostral utilizado foi de 1 (uma) amostra para cada 3 hectares, a profundidade amostrada foi de 20 cm, os elementos considerados para a realização deste trabalho foram, a altimetria, Argila, Matéria Orgânica, Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Saturação por Bases, pH, Saturação por Alumínio, Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Enxofre, Fósforo (P), Potássio (K), Saturação por Potássio, Enxofre (S), Boro (B), a partir destes elementos foram gerados através da interpolação dos resultados, os mapas de recomendação para Calcário, P e K.

O mapa de produtividade da lavoura foi gerado através do sistema FieldView™, composto por um drive, que é um dispositivo que se encaixa na porta CAN diagnóstica de seu

equipamento, coletando dados de campo e da máquina. Ele conecta sua máquina com o iPad® na cabine via Bluetooth®, e gera mapas e relatórios em tempo real no aplicativo FieldView Cab.

As imagens dos satélites foram obtidas gratuitamente por meio da ferramenta Land Viewer (Land Viewer, 2019), a qual permitiu realizar a busca, seleção e download das bandas e produtos de satélites. Foram selecionadas as seguintes imagens com dia de passagem e órbita/ponto e satélite, 27 de novembro de 2017 (223/72) Landsat 8 (30 DAP), 19 de dezembro de 2017 (22KEF) Sentinel 2A (52DAP) e 23 de janeiro de 2018 (222/72) Landsat 8 (87 DAP), foi realizado o download do produto NDVI, que é obtida pela equação 1.

O NDVI é calculado com valores de pixels das bandas do vermelho e do infravermelho próximo conforme a equação 1:

$$VI = \frac{(PNIR - Pred)}{(PNIR + Pred)} \quad \text{(Equação 1)}$$

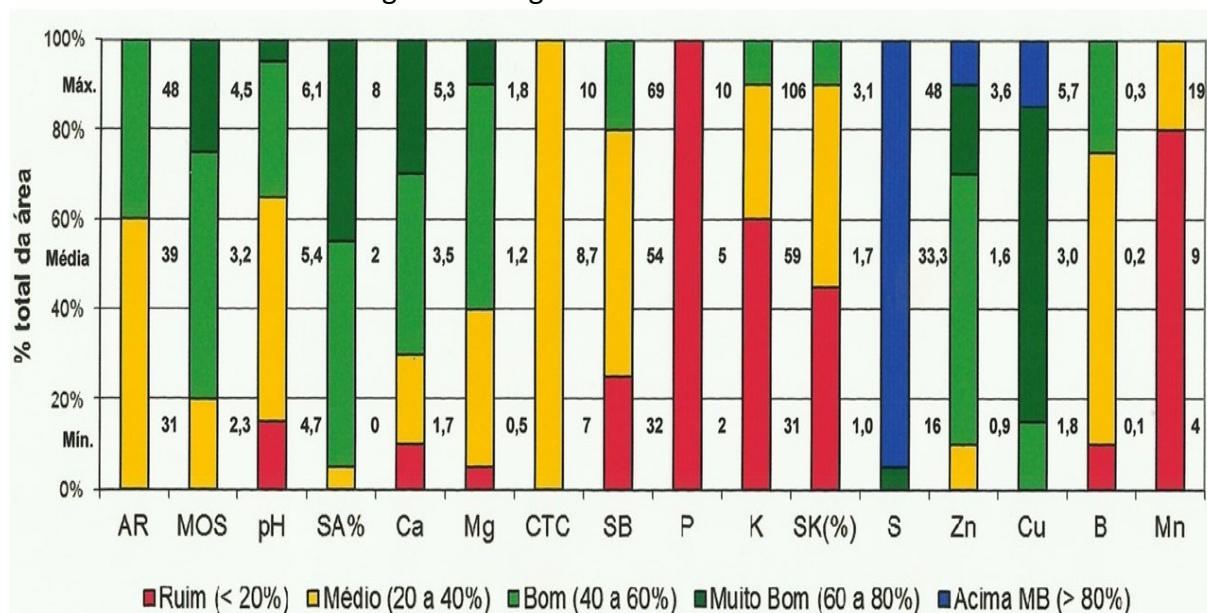
onde, NDVI: índice de vegetação por diferença normalizada; PNIR refere-se ao infravermelho próximo e a PRED ao vermelho.

Após download foram realizados os recortes das informações referentes à área geográfica da propriedade. Todas as bases foram integradas há um projeto no software Qgis v.2.18.14.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 representa o Fertigrama da área de estudo, onde podemos ver de maneira a representação qualitativa os níveis dos parâmetros físico-químicos do solo da área de estudo.

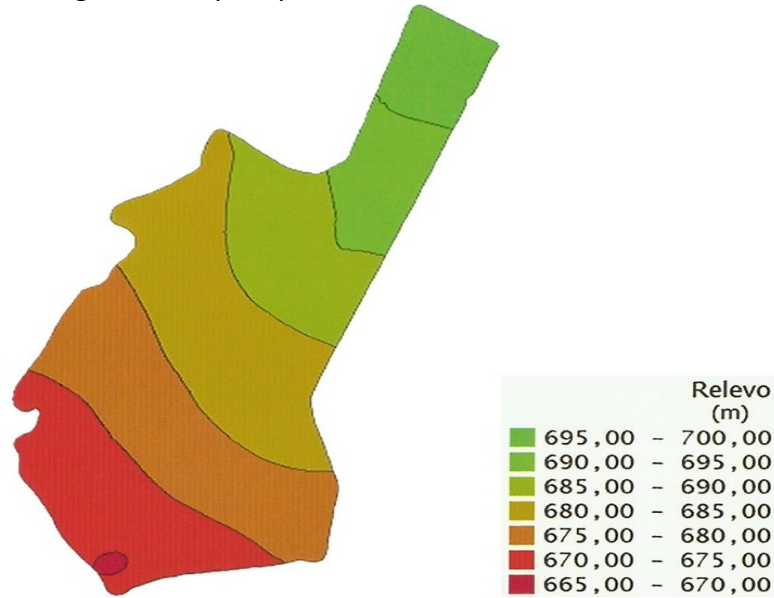
Figura 4: Fetigrama da área de estudo



Fonte: Autoria própria

A Figura 3 mostra o padrão de relevo da área de estudo, se compararmos a elevação do relevo com o Mapa de Matéria Orgânica, Mapa de Cálcio, NVDI e o Mapa de Produtividade (Figura 6, 9, 14, 15), observou que as regiões de maior altitude são as que possuem maiores níveis de Matéria Orgânica, Cálcio, NVDI e Produtividade, fato este que discorda de teorias populares de que as regiões mais baixas ou “baixadas” são as mais férteis ou que possuem melhores produtividades.

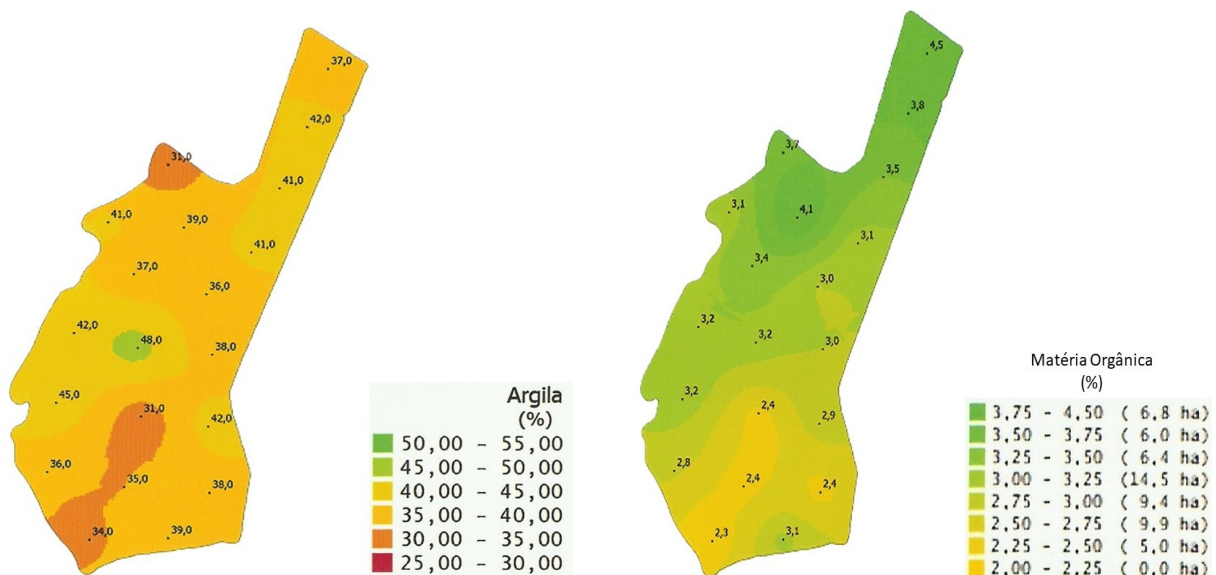
Figura 5: Mapa hipsométrico com as curvas de nível.



Fonte: Autoria própria

Na figura 4, tem-se os mapas de Argila e Matéria orgânica, pode-se observar no primeiro que os teores de argila estão em sua grande parte acima dos 30%, assim sendo como textura argilosa ([Santos et al. 2003](#)), no mapa de Matéria Orgânica, observou-se um padrão com os mapas de NDVI e o Mapa de Produtividade.

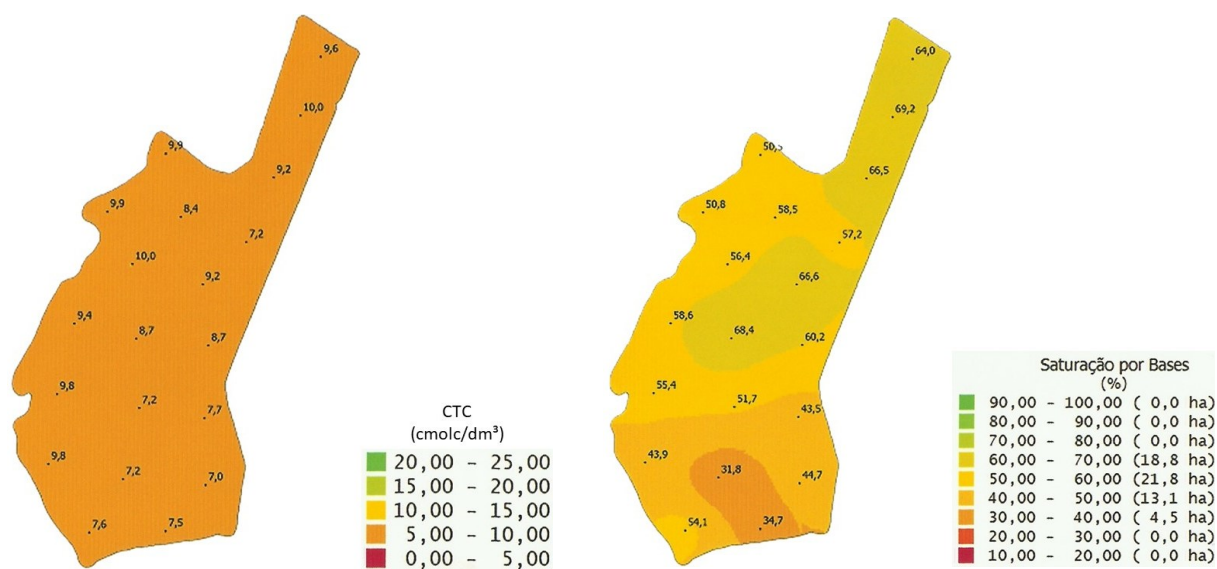
Figura 6: Mapa de argila e de matéria orgânica



Fonte: Autoria própria

Na Figura 5 temos os Mapas de CTC e Saturação por Bases, no primeiro, temos valores que vão de 5 a 10 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$, e no segundo temos uma Saturação por Bases que vai de 30 a 80%.

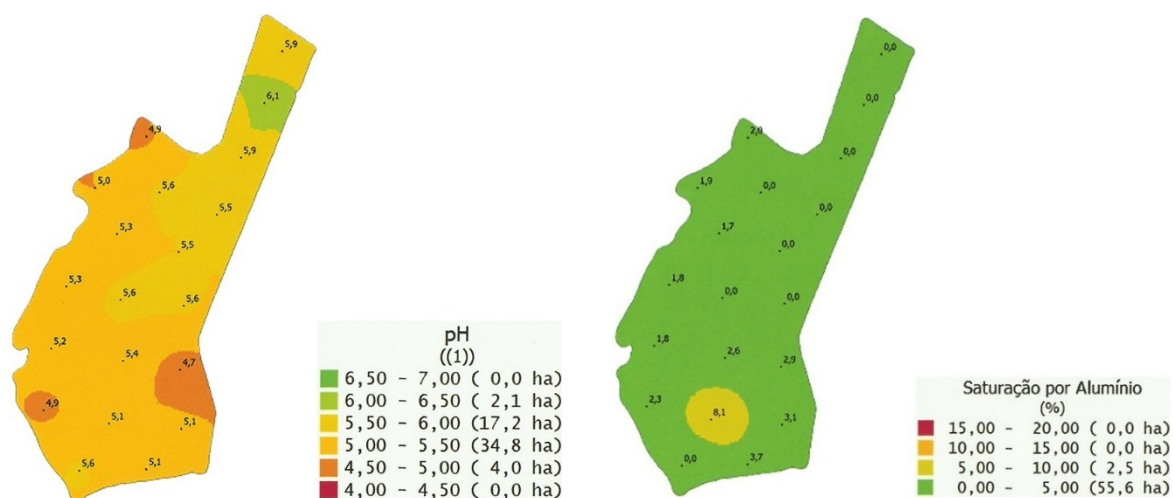
Figura 7: Mapa de Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e de Saturação por Bases.



Fonte: Autoria própria

Na Figura 6 tem-se os mapas de pH e Saturação por alumínio, onde no primeiro temos um pH entre 5,5 e 6,0, e no segundo temos uma Saturação por Alumínio que vai de 0 a 5%, sendo que em 95% da área esse valor é igual a 0%.

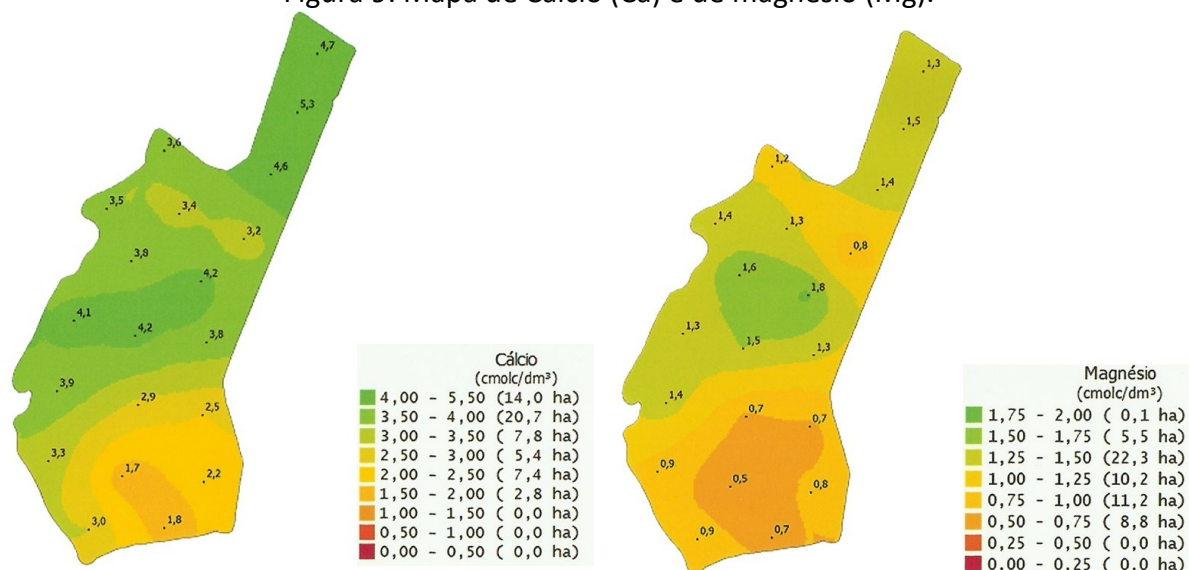
Figura 8: Mapa de pH e de Saturação por alumínio.



Fonte: Autoria própria

Na Figura 7 temos os mapas dos níveis de Cálcio e Magnésio no solo, onde no primeiro os níveis estão entre 2 e 5,5 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$, ao observar o mapa, os valores mais altos de Ca, seguiram um padrão de distribuição semelhante aos mapas de NDVI e Produtividade. No mapa de magnésio, temos valores entre 0,75 e 2,0 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$, porém visualmente através da imagem não é possível estabelecer com segurança um padrão com os mapas de NDVI e Produtividade.

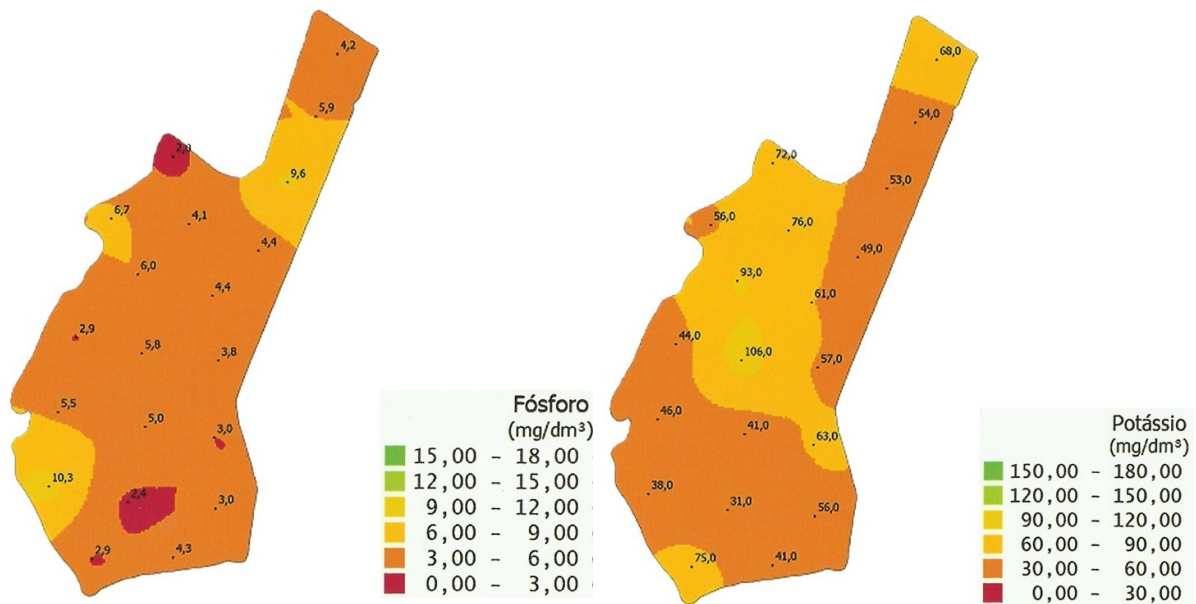
Figura 9: Mapa de Cálcio (Ca) e de magnésio (Mg).



Fonte: Autoria própria

Na Figura 8, tem-se os mapas de Fósforo e Potássio, com valores entre 0 e 12 $\text{mg}.\text{dm}^{-3}$ para Fósforo e 30 a 90 $\text{mg}.\text{dm}^{-3}$ para Potássio. Analisando as imagens visualmente não é possível notar um padrão com os mapas de NDVI e Produtividade.

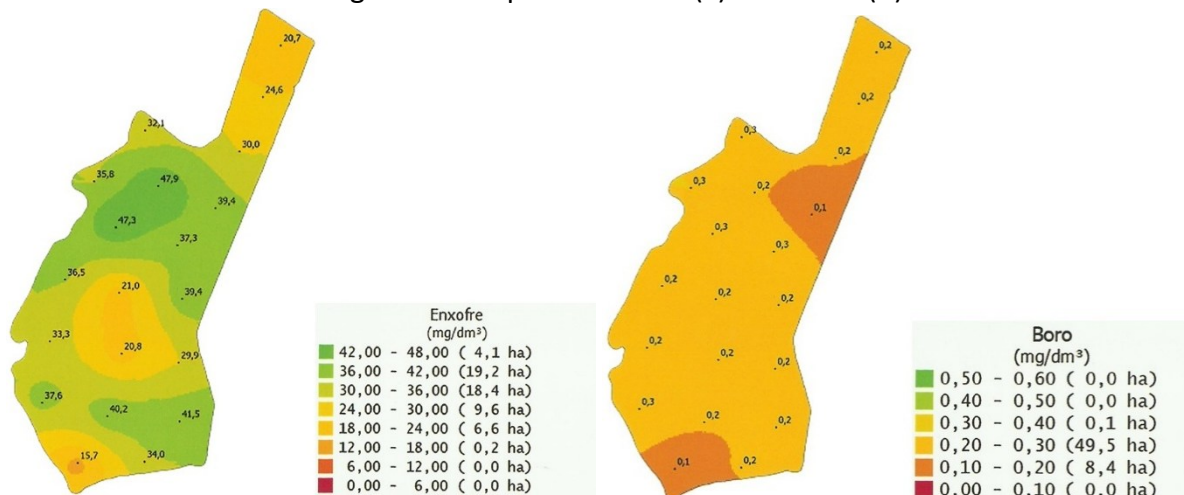
Figura 10: Mapa de Fósforo (P) e de Potássio (K).



Fonte: Autoria própria

Na Figura 9, tem-se os mapas de Enxofre e Boro, com valores entre 24 e 48 mg dm^{-3} para o Enxofre e 0,1 a 0,3mg. dm^{-3} para o Boro, observando as imagens não é possível visualmente determinar um padrão com os mapas de NDVI e Produtividade.

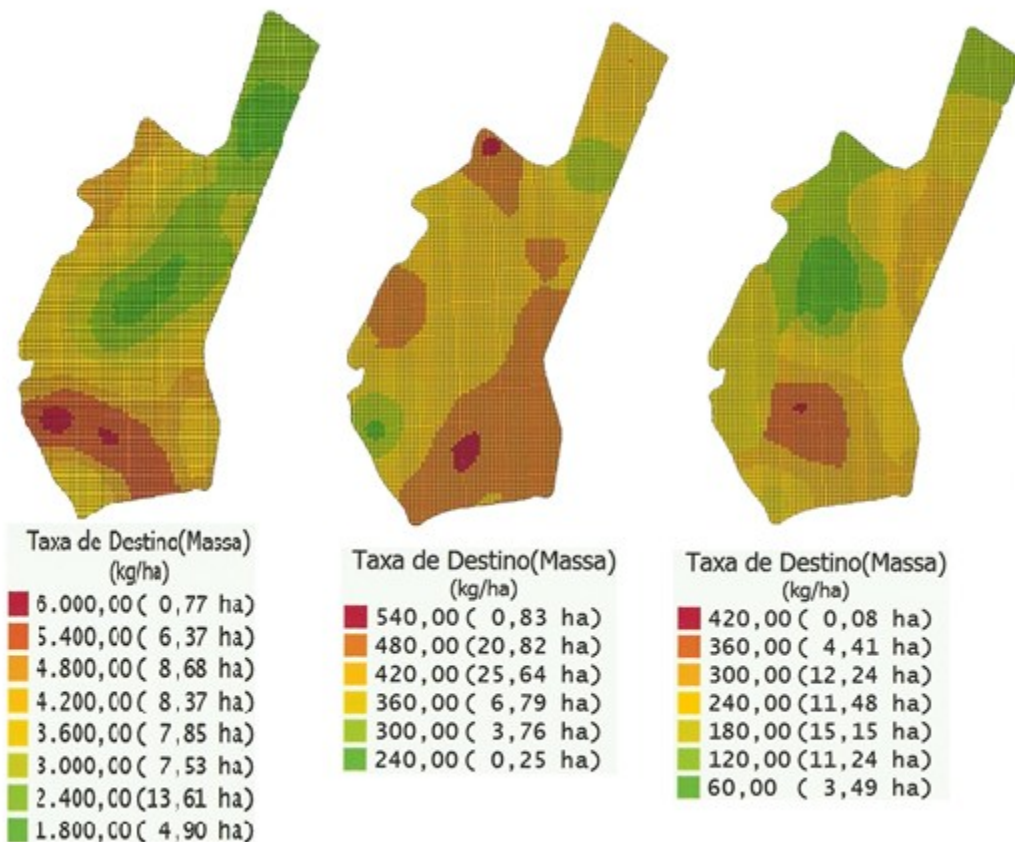
Figura 11: Mapa de Enxofre (S) e de Boro (B).



Fonte: Autoria própria

Na Figura 10, mapa de Taxa de Destino de Calcário, Fósforo e Potássio, observou-se que as regiões mais baixas foram as que receberam maiores quantidades, porém ao comparar com o NDVI (Figura 11) e o Mapa de Produtividade (Figura 12) podemos reparar que essas regiões não foram as que demonstraram níveis mais altos de NDVI e Produtividade.

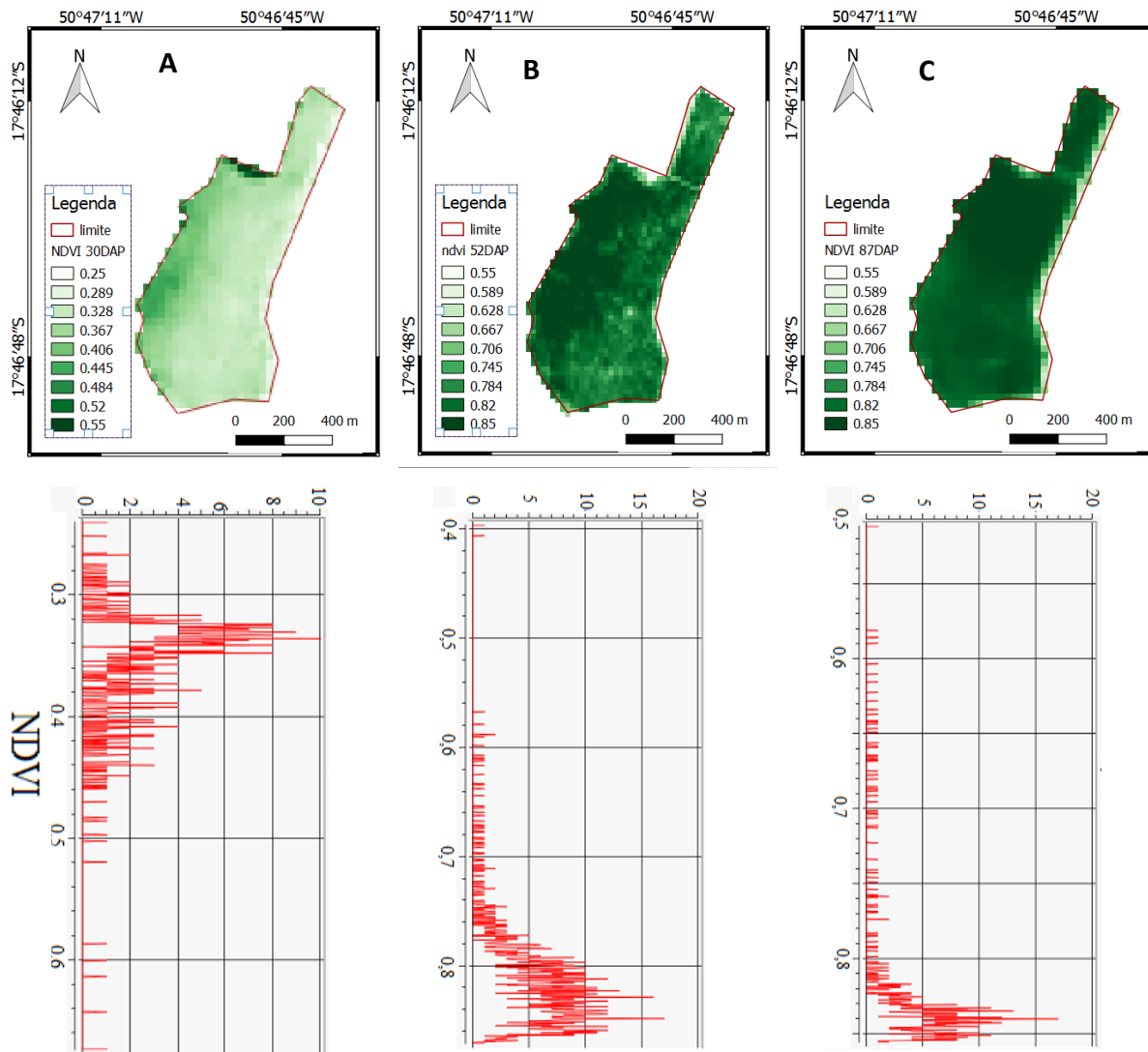
Figura 12: Mapa de Taxa de Destino para a distribuição de Calcário, P e de K.



Fonte: Autoria própria

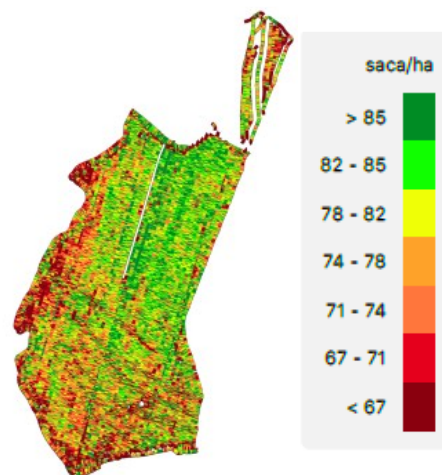
As Figuras 11 A, B e C, representaram respectivamente o NVDI da cultura aos 30, 52 e 87 dias após o plantio, percebe se que existe uma tendência entre as Figuras 11 B e 11 C com o mapa de produtividade, onde há a predominância da cor verde mais intensa, coincide com as áreas de maior produtividade indicada na Figura 12, o que demonstra que a região onde houve um maior índice de vegetação foram também as que alcançaram as maiores produtividades. A Figura 11 A apresenta um nível de NVDI bem baixo, devido a cultura estar em fase inicial de desenvolvimento, não havendo área vegetativa considerável, e ainda apresentou maior influência da exposição do solo descoberto.

Figura 13: Mapas e histograma de frequência de NDVI obtidos na cultura da soja, aos 30 (A), 52 (B) e 87 (C) dias após o plantio.



Fonte: Autoria própria

Figura 14: Mapa de produtividade da cultura da soja safra 2017/2018.



Fonte: Autoria própria

Por meio da Figura 11A, B e C, observou-se os histogramas de frequência dos mapas de NDVI obtidos aos 30, 52 e 87 DAP. A média dos valores obtidos aos 30 DAP (Figura 11A) foi de aproximadamente 0,35, e considera uma dispersão frequente entre 0,25 a 0,45, evidenciando que a cultura em estágio inicial, ainda tem a influência do solo descoberto, além da pequena quantidade e atividade das folhas para os processos fisiológicos, respondendo assim a baixos valores de NDVI.

Com o estabelecimento da cultura no campo e em estágios intermediários, o dossel apresentou 100% de cobertura do solo, bem como acúmulo de folhas em alta atividade fotossintética, respondem positivamente aos índices de vegetação, como observado aos 52 e 87 DAP nas médias dos histogramas das Figuras 11B, e 11C, respectivamente. Observa ainda que aos 87 DAP, além da alta média dos valores de NDVI, há também uma baixa dispersão (0,8 a 0,85), considerando que é a fase crítica e com alta relação desse indicador, com a resposta produtiva da cultura, conforme já evidenciado por meio da Figura 11C.

6. CONCLUSÃO

As regiões de maior altitude foram as que tiveram maiores índices de NDVI e produtividade. As regiões com maiores teores de Matéria Orgânica e Cálcio tiveram maiores índices de NDVI e produtividade do que as que receberam maiores quantidades de Calcário, P e K.

Em sua fase inicial a cultura possui pouca atividade fisiológica, por isso possui baixos valores de NDVI. Aos 87 DAP tem-se o pico dos valores de NDVI, e baixa dispersão considerando que é a fase crítica e com alta relação com a resposta produtiva da cultura.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso do sensoriamento remoto associado às ferramentas da agricultura de precisão demonstrou grande potencial para o monitoramento da variabilidade espacial dos atributos do solo e sua relação com a produtividade da cultura da soja. Os resultados obtidos evidenciaram que áreas com maiores teores de matéria orgânica e cálcio, bem como regiões de maior altitude, apresentaram maiores índices de NDVI e produtividade, reforçando a influência dos atributos físico-químicos do solo no desempenho da cultura.

Dessa forma, conclui-se que a integração entre mapas de fertilidade, índices de vegetação e mapas de produtividade constitui uma importante ferramenta para a tomada de decisão no manejo agrícola, contribuindo para maior eficiência no uso de insumos, sustentabilidade produtiva e otimização da produtividade da cultura da soja.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio institucional da Universidade Estadual de Goiás, por meio de aquisição de equipamentos e custeio do Edital UEG Nº 05/2021 pró-projetos 2021 (SEI 202100020013910), Edital UEG Nº 22/2022 Pró-projetos 2022 (SEI 202200020022752); Edital UEG Nº 52/2023, Projeto de Encomenda Externa (SEI 202300020023055); Edital UEG Nº 20/2023, pró-projetos 2023 Segurança Hídrica (SEI 202300020023352).

REFERÊNCIAS

- BRANDÃO, Z. N.; BEZERRA, M. V. C.; FREIRE, E. C.; SILVA, B. B. Agricultura de precisão para gerenciamento do algodão. IN: AZEVÊDO, D. M. P.; BELTRÃO, N. E. M. **O agronegócio do algodão no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. 1309 P. CAP. 20. V. 2.
- EPIPHANIO, J.C.N. **Sensoriamento Remoto em agricultura**. In: Formaggio AR, Sanches I del'Arco. Apresentação. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 284p.
- FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. Ed. Oficina de Textos, 3ª edição. São Paulo/SP, 2011.
- FOLEY, J.A, RAMANKUTTY N., et al. Solutions for a cultivated Planet. **Nature**. v.478, p.337-342. 2011.
- FORMAGGIO A.R, SANCHES I.Del'A. **Sensoriamento Remoto em agricultura**. São Paulo: Oficina de Textos, 284p.2017.
- GIONGO, P. R., SANTOS, D. DE M., NEVES, T. M. G. DE M., COSTA, A. R. DA, SILVA, P. C., & TAVEIRA, J. H. DA S. Remote sensing and geostatistics applied to NDVI, Kc and productive parameters in irrigated corn crop. **Irriga**, v.28, p.535–544. 2023.
- GIONGO, P. R., BARBOSA DE MORAIS, K. C., SILVA, M. V. DA, SANTOS, A. J. M., BACKES, C., RIBON, A. A., & PANDORFI, H. Chemical and granulometric characterization of soil and its influence on the bromatologic composition of pastures in savannah region, Central Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v.114, p.103703–103714. 2022.
- KOOPEN, W. Das geographische ssytem der klimate. In: HANDBUGH der klimatologie. Berlin: **Gebruder Borntraeger**, 1936. V. 1, part C., p. 1-44.

- MAGALHÃES, M. R., OLIVEIRA, M. S. DE, REZENDE, N. M. DA C., TAVEIRA, J. H. DA S., GIONGO, A. M. M., & GIONGO, P. R. Composições do uso do solo no Cerrado Goiano para a qualidade de água em nível de sub bacias / Land use compositions in the Cerrado of Goiás for water quality at the watershed. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, 1, p.1–18. 2026.
- MOBLEY. Light and water: radiative transfer in natural waters. San Diego: **Academic Press**, 592p. 1994.
- MOREIRA, M.A. **Fundamentos de sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 4ªed. Viçosa: UFV, 422p. 2011.
- NARVAEZ, F.Y, REINA G, TORRES-TORRITI M, KANTOR G, CHEEIN, F.A. **A Survey of Ranging and Imaging Techniques for Precision Agriculture Phenotyping**. **Transactions on Mechatronics**. v.22: 2428-2439. 2017.
- NOVO E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Ed. Blucher, 363p. 2008.
- ROZA, D. Novidade no campo: Geotecnologias renovam a agricultura. **Revista Info GEO**, n 11 - jan/fev, 2000. Disponível em: <http://www.infogeo.com.br/Revista/materia_11.htm>. Acesso em: 05 Mai. 2026.
- SANTOS, H. G. dos et al. **Propostas de revisão e atualização do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, (EMBRAPA Solos. Documentos, 53. 2003. 56 p.
- SILVA, J. L. P. DA, JÚNIOR, G. DO N. A., SILVA JUNIOR, F. B. DA, SILVA, T. G. F. DA, SILVA, J. B. A. DA, SCHEIBEL, C. H., SILVA, M. V. DA, MINGOTI, R., GIONGO, P. R., & ALMEIDA, A. C. DOS S. **Performance of land use and land cover classification models in assessing agricultural behavior in the Alagoas semi-arid region**. **Agriengineering**, 7, p.134–170. 2025.
- SOUSA, L. F. A.; GIONGO, P.R. Revisão de literatura: uso do geoprocessamento na avaliação da degradação de pastagens. **Revista Sapiência: Sociedade, Saberes E Práticas Educacionais**, v. 11, p. 1-15, 2022.
- SHIRATSUCHI, L.S, BRANDÃO, Z.N, VICENTE, L.E, VICTORIA, D.C, DUCATI, J.R, OLIVEIRA, R.P, VILELA, M.F. Sensoriamento Remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão. In: BERNARDI A.C.C, NAIME J.M, RESENDE A.V, BASSOI L.H, INAMASU R.Y. Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília: **EMBRAPA**, Cap. 4. p.58-73. 2014.
- STAFFORD, J.V. An investigation into the within-field spatial variability of grain quality. In: European conference on precision agriculture, 2., Odense. Proceedings ... Sheffield: **Sheffield Academic Press**, p. 353-361. 1999.

ZERBATO, C.; ROSALEN, D.L.; FURLANI, C.E.A; DEGHAID, J.; VOLTARELLI, M.A.; Agronomic characteristics associated with the normalized difference vegetation index (NDVI) in the peanut crop. **Australian Journal of Crop Science**. v.10:758-764. 2016.

CAPÍTULO VIII

PLANILHA ELETRÔNICA COMO FERRAMENTA PARA A SELEÇÃO E DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS OPERACIONAIS DE MÁQUINAS E IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS TRATORIZADOS

ELECTRONIC SPREADSHEET AS A TOOL FOR THE SELECTION AND DETERMINATION OF OPERATIONAL COSTS OF TRACTOR-DRIVEN AGRICULTURAL MACHINERY AND IMPLEMENTS

DOI: 10.51859/amplla.mac6200-8

Luiz Henrique de Souza ¹

Victor Lucas Fernandes ²

Rogério Santos Maciel ²

João Francisco da Silva Filho ³

¹ Doutor em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa (UFV)

² Mestre em Modelagem Computacional. Universidade Estadual de Montes Claros (UNIMONTES)

³ Bacharel em Engenharia Elétrica. Faculdades Integradas do Norte de Minas (FUNORTE)

RESUMO

Objetivou-se com este trabalho o desenvolvimento de uma planilha eletrônica em Excel para determinar os custos operacionais e a seleção de máquinas e equipamentos agrícolas tratorizados facilitando o trabalho dos produtores rurais, engenheiros e estudantes. Inicialmente foi realizada uma revisão de literatura detalhada sobre o assunto seguido do desenvolvimento da planilha utilizando os cálculos matemáticos. Utilizou-se uma metodologia que permita a determinação da capacidade operacional efetiva e teórica e da seleção das máquinas e equipamentos tratorizados considerando a largura de trabalho, a área trabalhada, a velocidade de operação, eficiência e tempo total de operação e dos custos operacionais considerando os custos fixos e variáveis. Essa planilha pode ser considerada como uma ferramenta eficiente e rápida para análises relativas à seleção e avaliação de custos de equipamentos mecanizados tratorizados.

Palavras-chave: Mecanização agrícola. Custos operacionais. Equipamentos tratorizados.

ABSTRACT

This study aimed to develop an Excel spreadsheet to determine the operational costs and selection of tractor-driven agricultural machinery and equipment, facilitating the work of rural producers, engineers, and students. Initially, a detailed literature review was carried out on the subject, followed by the development of the spreadsheet using mathematical calculations. A methodology was used that allows the determination of effective and theoretical operational capacity and the selection of tractor-driven machinery and equipment, considering working width, worked area, operating speed, efficiency, and total operating time, as well as operational costs considering fixed and variable costs. This spreadsheet can be considered an efficient and fast tool for analyses related to the selection and cost evaluation of tractor-driven mechanized equipment.

Keywords: Agricultural mechanization. Operational costs. Tractor-driven equipment.

1. REVISÃO DE LITERATURA

O avanço da produção agrícola brasileira ocorreu por diversos fatores, entre eles o desenvolvimento da tecnologia rural voltada à gestão moderna. Nessa abordagem, princípios administrativos aliados às novas tecnologias passaram a ser incorporados à administração das propriedades com o objetivo de aumentar a eficiência, a produtividade e a competitividade do negócio, transformando a fazenda em uma empresa com foco na geração de lucro (VERGARA & CRUZ, 2025).

O processo de mecanização e as inovações tecnológicas trouxeram avanços expressivos principalmente com o propósito de se adequar às necessidades do homem, meio ambiente, produtividade e as condições de segurança. Atualmente existem maquinários adaptados as mais diversas condições de trabalho e com inúmeros padrões de potência, visando atender às demandas geradas na atividade agrícola, com maior conforto, rendimento, eficiência e segurança. Os pacotes tecnológicos trazem, contudo, aumento de custos relacionados à compra e manutenção dos ativos, exigindo, portanto, uma gestão econômica mais eficiente e dinâmica das empresas no que tange os processos operacionais mecanizados. Neste contexto ressalta-se a importância da avaliação do custo operacional de máquinas como alternativa de assegurar o planejamento financeiro nas operações visando a sustentabilidade econômica no campo (COELHO, FREITAS, BENEDITO, 2022)

Segundo Rabelo, Souza & Oliveira (2017), dentre os custos envolvidos numa produção agrícola aqueles com máquinas agrícolas e insumos são um dos principais. Os Custos Fixos são aqueles que não dependem do uso dos equipamentos como a Depreciação, Juros, Alojamento e Seguro, já os Custos Variáveis são aqueles que variam com a quantidade utilizada pelos equipamentos como combustíveis (óleo Diesel), lubrificantes líquidos, reparos e manutenção, salário do tratorista, entre outros.

Existe hoje, no meio rural, a necessidade de ferramentas eletrônicas de fácil operação que possam auxiliar o trabalho dos produtores rurais e a compreensão de dados de campo pelos estudantes em situações reais de projeto.

Segundo Costa e Macri (2018), a planilha eletrônica é uma ferramenta prática que pode ser encontrada gratuitamente e oferece um universo de opções para se criar a melhor maneira de gerir os processos organizacionais, o que pode ajudar consideravelmente na sobrevivência da empresa, havendo além da implantação o acompanhamento contínuo.

Salientam ainda que o uso de planilhas eletrônicas é uma saída eficaz, principalmente para micro e pequenas empresas, que buscam praticidade e custo-benefício, por se tratar de um software com infinitas possibilidades a um valor bem abaixo de sofisticados sistemas.

Denari et al. (2016), destacam que o Programa Computacional Excel® é altamente difundido e reúne planilhas de cálculo que podem ser usadas para as mais diversas aplicações e com as mais diferentes formas de apresentação.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo a construção de planilha eletrônica como ferramenta para a seleção e determinação dos custos operacionais envolvidos na utilização de equipamentos e implementos agrícolas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

As planilhas eletrônicas foram desenvolvidas em Excel considerando duas modalidades sendo a seleção dos equipamentos tendo como dados de entrada a área trabalhada (ha), a velocidade de trabalho (km/h), a eficiência de trabalho da operação (%) e o tempo total utilizado no trabalho (h) e como saída os dados de capacidade operacional (teórica e efetiva) (ha/h) e a largura do equipamento. Já os dados de avaliação econômica tiveram como dados de entrada os custos iniciais das máquinas e implementos e como saída os custos Fixos e Variáveis.

Na construção da planilha de Seleção utilizou-se as equações de capacidade operacional teórica e efetiva conforme descrito abaixo:

$$COE = \frac{A}{t} \quad (1)$$

em que:

COE = Capacidade Operacional Efetiva, ha/h;

A = Área trabalhada; ha; e

t = Tempo total de trabalho, h.

$$COT = \frac{COE \times Ef}{100} \quad (2)$$

em que:

COT = Capacidade Operacional Teórica, ha/h;

Ef = Eficiência, %.

Desta forma a seleção dos equipamentos levou em consideração a largura de trabalho conforme a equação 3.

$$L = \frac{COT \times 10}{v} \quad (3)$$

em que:

L = Largura de trabalho, m;

v = Velocidade de trabalho, km/h.

Já para a avaliação econômica foi utilizada as seguintes equações de Custos Fixos e Variáveis:

Custos Fixos

$$D = \frac{V_a - S}{V_u} \quad (4)$$

em que:

D = Depreciação, R\$/h;

V_a = Valor de aquisição, R\$;

S = Valor de Sucata, R\$;

V_u = Vida útil, h.

$$J = \left(\frac{V_a + S}{2 \times H} \right) \times i \quad (5)$$

em que:

J = Juros, R\$/h;

H = Horas anuais, h;

i = Taxa de juros, decimal.

$$A = \frac{0,01 \times V_a}{H} \quad (6)$$

em que:

A = Alojamento, R\$/h;

$$Sg = \frac{0,01 \times Va}{H} \quad (7)$$

em que:

Sg = Seguro, R\$/h;

Custos Variáveis

$$SO = \frac{((1,5 \times SM) + 20\%SM)}{25 \times 8} \quad (8)$$

em que:

SO = Salário do operador, R\$/h;

SM = Salário mínimo vigente, R\$.

O consumo de combustível foi calculado considerando a quantidade gasta por hora multiplicada pelo preço por litro.

O custo com óleo hidráulico e óleo do motor foram calculados multiplicando-se a capacidade dos respectivos reservatórios pelo preço dos respectivos óleos divididos pelos respectivos tempos de troca conforme o fabricante.

Por fim foi determinado o gasto com reparos e manutenções conforme a equação abaixo.

$$RM = \frac{Fr \times Va}{Vu} \quad (4)$$

em que:

RM = Reparo e manutenção, R\$/h;

Fr = Fator de reparo e manutenção, decimal.

Já na seleção dos equipamentos adotados foram utilizados dados de entrada como velocidade de operação, área trabalhada, eficiência de trabalho.

SELEÇÃO DE SEMEADORAS

DADOS DE ENTRADA			CAPACIDADE OPERACIONAL	
Área trabalhada (ha)	80,0		Capacidade de Campo Efetiva (ha/h)	2,3
Velocidade de trabalho (km/h)	5,7		Capacidade de Campo Teórica (ha/h)	1,4
Eficiência de trabalho (%)	60,0			
Tempo total da operação (h)	35,0			
Largura entre linhas (m)	0,8			
			SELEÇÃO DA SEMEADORA	
			Largura da semeadora (m)	2,4
			Número de linhas	3,0

Fonte: Autoria própria

Figura 3: Valores de Seleção de uma grade de discos

SELEÇÃO DE GRADES DE DISCOS

DADOS DE ENTRADA		CAPACIDADE OPERACIONAL	
Área trabalhada (ha)	60,0	Capacidade de Campo Efetiva (ha/h)	1,5
Velocidade de trabalho (km/h)	5,0	Capacidade de Campo Teórica (ha/h)	1,3
Eficiência de trabalho (%)	85,0		
Tempo total da operação (h)	40,0		
		SELEÇÃO DA GRADE	
		Largura da grade (m)	2,6

Fonte: Autoria própria

Nas Tabelas 2 e 3 podem observar que, com os dados de entrada, conseguimos valores de 2,4 m e 3 linhas para a semeadora e 2,6 m para a grade de discos.

Costa e Macri (2018) reforçam, em seu trabalho, que por se tratar de planilhas eletrônicas criadas através do Microsoft Excel, elas podem ser facilmente modificadas para outras instituições, bem como alteradas para o próprio campo de estudo, caso seja necessária alguma modificação. Essa flexibilidade é mais um ponto positivo que essa ferramenta possibilita.

Ainda segundo os autores anteriores, com as planilhas eletrônicas será possível ver de forma simples e até panorâmica o que entra e o que sai de uma empresa, conhecer o excesso de gastos e o que trouxe o excesso de receita. Através delas também será possível controlar os horários dos funcionários.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As planilhas eletrônicas forneceram informações importantes para facilitar o entendimento do usuário e tornar mais prático o controle dos dados da propriedade rural.

As planilhas construídas em Excel podem ser manipuladas e modificadas para outros campos de estudo.

Ao manipular as planilhas, esta ferramenta pode despertar maior interesse por parte dos estudantes no aprendizado e no conteúdo.

REFERÊNCIAS

- COELHO, K. C.; FREITAS, L. C.; BENEDITO, D. C. D. CUSTO OPERACIONAL DE TRATOR AGRÍCOLA: UM ESTUDO DE CASO. Territorialidades da Agricultura Brasileira - ISBN 978-65-5360-130-7 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.org - Vol. 1 - Ano 2022.
- COSTA, A. B.; MACRI, L. M. S. R. PLANILHAS ELETRÔNICAS COMO FERRAMENTA DE APOIO A DECISÃO EM UMA EMPRESA DA CIDADE DE PAU DOS FERROS – RN.
- DENARI, G. B.; SACIOTO, T. R.; CAVALHEIRO, É. T. G. AVALIAÇÃO DO USO DE PLANILHAS COMPUTACIONAIS COMO UMA FERRAMENTA DIDÁTICA EM QUÍMICA ANALÍTICA QUALITATIVA. *Quim. Nova*, Vol. 39, No. 3, 371-375, 2016.
- RABELO, C. G.; SOUZA, L. H.; OLIVEIRA, F. G. Análise dos custos de produção de silagem de milho: estudo de caso. *Caderno de Ciências Agrárias*, v. 9, n. 2, p. 08-15, 2017.
- VERGARA, W. R. H.; CRUZ, R. F. Viabilidade econômico-financeira de pulverizadores: autopropelido e drones. *Rev. Sítio Novo Palmas*, v. 9, P. 1-21, 2025.

CAPÍTULO IX

BOAS PRÁTICAS NA OBTENÇÃO E COLETA DE LEITE PARA FINS DE ANÁLISE

GOOD PRACTICES IN MILK SAMPLING AND COLLECTION FOR LABORATORY ANALYSIS

DOI: 10.51859/ampla.mac6200-9

Tainá Pereira de Souza Rocha Santos¹
Karyne Oliveira Coelho²

¹ Mestre em Produção Animal e Forragicultura (PAF). Universidade Estadual de Goiás: Câmpus Oeste – Sede São Luís de Montes Belos – UEG

² Professora Dra. Adjunta do Instituto de Ciências Agrárias e Sustentabilidade (IACAS). Universidade Estadual de Goiás: Câmpus Oeste – Sede São Luís de Montes Belos – UEG

RESUMO

O leite é um alimento de elevado valor nutricional, essencial à saúde humana por conter vitaminas, proteínas, lipídios e sais minerais. No entanto, sua composição o torna suscetível à contaminação por microrganismos, o que exige rigoroso controle higiênico-sanitário ao longo de toda a cadeia produtiva. A crescente demanda por produtos lácteos intensifica o desafio de garantir a segurança e a qualidade do leite, uma vez que a presença de bactérias patogênicas pode comprometer características sensoriais e tecnológicas do produto. No Brasil, as Instruções Normativas nº 76 e nº 77 de 2018 estabelecem padrões de qualidade para o leite cru refrigerado, leite pasteurizado e leite tipo A, definindo procedimentos que assegurem tanto a saúde dos animais quanto a segurança do consumo humano. Do ponto de vista microbiológico, a qualidade do leite é avaliada principalmente pela Contagem de Células Somáticas, indicativa de mastite, e pela Contagem Padrão em Placas, que reflete o grau de contaminação durante a ordenha, transporte e armazenamento. Práticas como a ordenha higiênica, o uso de equipamentos adequados, o resfriamento imediato a 4 °C e o uso de conservantes são fundamentais para manter baixos os níveis desses indicadores. Além disso, o correto manuseio e a pronta análise das amostras são cruciais para a confiabilidade dos testes laboratoriais. Assim, é imprescindível o uso das boas práticas na obtenção na coleta de leite, enfatizando os fatores que influenciam seus parâmetros de qualidade e reforçando a importância das medidas sanitárias para garantir a segurança e a confiabilidade do produto.

Palavras-chave: Análise. Composição. CCS. CCP. Qualidade do leite. Segurança alimentar.

ABSTRACT

Milk is a food of high nutritional value, essential to human health due to its content of vitamins, proteins, lipids, and mineral salts. However, its composition makes it susceptible to contamination by microorganisms, which requires strict hygienic-sanitary control throughout the entire production chain. The growing demand for dairy products intensifies the challenge of ensuring milk safety and quality, since the presence of pathogenic bacteria can compromise the sensory and technological characteristics of the product. In Brazil, Normative Instructions No. 76 and No. 77 of 2018 establish quality standards for refrigerated raw milk, pasteurized milk, and type A milk, defining procedures that ensure both animal health and the safety of human consumption. From a microbiological standpoint, milk quality is assessed primarily through Somatic Cell Count, an indicator of mastitis, and Standard Plate Count, which reflects the degree of contamination during milking, transport, and storage. Practices such as hygienic milking, the use of appropriate equipment, immediate cooling to 4 °C, and the use of preservatives are essential to keeping these indicators low. In addition, proper handling and prompt analysis of samples are crucial for the reliability of laboratory tests. Therefore, the use of good practices in milk collection is essential, emphasizing the factors that influence its quality parameters and reinforcing the importance of sanitary measures to ensure the safety and reliability of the product.

Keywords: Analysis. Composition. SCC. SPC. Milk quality. Food safety.

1. INTRODUÇÃO

O leite é amplamente reconhecido como um alimento de elevado valor nutricional, sendo fonte de vitaminas, lipídios, proteínas e sais minerais essenciais à saúde humana. Esses nutrientes o tornam um componente importante da dieta de indivíduos de todas as idades e classes sociais, contribuindo para o crescimento, o desenvolvimento e a manutenção das funções vitais do organismo (Sarode, 2016).

No entanto, sua rica composição também o torna um meio ideal para o crescimento e multiplicação de diversos microrganismos, incluindo bactérias deteriorantes e patogênicas, que podem comprometer sua qualidade e representar riscos à saúde do consumidor (Azevedo Câmara *et al.*, 2024). Por isso, o controle higiênico-sanitário em todas as etapas da cadeia produtiva do leite é essencial para garantir sua segurança e prolongar sua vida útil.

Garantir a produção higiênica do leite tornou-se um dos principais desafios da cadeia láctea, especialmente diante do crescimento contínuo da demanda por produtos derivados. A contaminação bacteriana, além de comprometer a segurança alimentar, afeta diretamente a qualidade do leite e de seus derivados, influenciando características sensoriais como sabor, odor e textura, além de impactar parâmetros tecnológicos importantes para o processamento industrial (Lu *et al.*, 2022).

As Instruções Normativas (IN) nº 76 e nº 77 (Brasil, 2018a,b) estabelecem os padrões de qualidade exigidos para o leite cru refrigerado, o leite pasteurizado e o leite pasteurizado tipo A no Brasil. Além disso, definem critérios e procedimentos referentes à produção, acondicionamento, conservação, transporte, seleção e recepção do leite cru em estabelecimentos registrados no serviço de inspeção oficial, com o intuito de garantir a segurança do consumo humano, bem como a saúde e o bem-estar dos animais de produção.

Do ponto de vista higiênico-sanitário, a qualidade do leite é avaliada principalmente por dois indicadores: a Contagem de Células Somáticas (CCS) e a Contagem Padrão em Placas (CPP). A CCS reflete a saúde da glândula mamária das vacas, sendo elevada principalmente em casos de mastite, enquanto a CPP indica o grau de contaminação microbiana do leite, influenciado diretamente pelas práticas de higiene durante a ordenha, armazenamento e transporte (Lopes *et al.*, 2022).

A obtenção de leite a partir de animais clinicamente sadios, associada a boas práticas de higiene e ao resfriamento imediato do leite a 4 °C, são medidas fundamentais para manter

baixos os níveis de CCS e CPP, assegurando a qualidade microbiológica e a segurança alimentar do leite in natura e dos produtos lácteos derivados. (Brasil, 2018b; Jiménez *et al.*, 2021).

As melhores práticas de coleta de leite envolvem o uso de métodos de ordenha apropriados, a garantia de limpeza, a escolha de recipientes adequados, o registro das condições de coleta e a minimização dos riscos de contaminação. As amostras devem ser processadas imediatamente, com condições de armazenamento otimizadas para preservar os constituintes do leite e assegurar a precisão das análises. Entre essas práticas, destaca-se a refrigeração imediata das amostras contendo conservantes, a divisão em subamostras e a minimização do pré-aquecimento. É essencial que as amostras cheguem ao laboratório em boas condições, a fim de possibilitar testes confiáveis de qualidade e composição.

Objetiva-se apresentar uma revisão de literatura sobre as boas práticas na obtenção e coleta de leite para fins de análise, com ênfase nos fatores que impactam os parâmetros de qualidade, como a CCS, a CPP e a composição do leite. Busca-se reunir evidências científicas que reforcem a importância das práticas higiênico-sanitárias desde a ordenha até o armazenamento, a fim de garantir a confiabilidade dos resultados laboratoriais e a qualidade do produto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. QUALIDADE DO LEITE NA ORIGEM

A qualidade do leite cru na fazenda está diretamente influenciada por fatores intrínsecos e extrínsecos ao processo produtivo. Entre os fatores intrínsecos destacam-se a saúde do animal, o estágio da lactação, a dieta e o metabolismo, que afetam as propriedades físico-químicas e microbiológicas do leite ((Fonseca; Xavier; Paiva, 2025) 2025). Já os fatores extrínsecos envolvem o manejo durante a ordenha, as condições ambientais e a higienização, que interferem diretamente na qualidade final do produto (Azevedo Câmara *et al.*, 2024).

Um dos principais indicadores da qualidade do leite na origem é a CCS, que reflete o estado sanitário da glândula mamária. Níveis elevados de CCS indicam processos inflamatórios, como a mastite, comprometendo a qualidade do leite e podendo resultar na rejeição do lote (Ströher *et al.*, 2024b). Outro parâmetro fundamental é CPP que aponta o grau de contaminação microbiológica e a adequação do leite para o processamento. A CPP elevada evidencia falhas na higiene da ordenha, armazenamento e transporte, aumentando o risco de deterioração e presença de patógenos (Azevedo Câmara *et al.*, 2024).

A presença de microrganismos patogênicos como *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* e *Listeria monocytogenes* representa risco à saúde pública, reforçando a necessidade de monitoramento rigoroso (Souza *et al.*, 2021). Além dos aspectos microbiológicos, parâmetros físico-químicos como teor de gordura, proteína, lactose e sólidos totais são essenciais para garantir que o leite atenda às exigências técnicas do mercado e da legislação (Ströher *et al.*, 2024b).

O manejo nutricional e o estado de saúde do rebanho influenciam diretamente a composição do leite, tornando indispensável uma dieta equilibrada para manter a qualidade ideal. Também é fundamental o controle rigoroso sobre resíduos químicos e antibióticos provenientes do uso veterinário, evitando riscos à segurança alimentar e rejeição no mercado (Bartolomeu *et al.*, 2024).

A qualidade do leite na fazenda impacta toda a cadeia produtiva e industrial. Leite de baixa qualidade pode gerar perdas na fabricação de derivados, elevar custos operacionais e reduzir a vida útil dos produtos finais, afetando a satisfação do consumidor (Ströher *et al.*, 2024a). Por isso, a avaliação periódica e o monitoramento contínuo da qualidade do leite na origem são indispensáveis para garantir a segurança alimentar e fortalecer a competitividade dos produtores no mercado (Ströher *et al.*, 2024a; (Fonseca; Xavier; Paiva, 2025) 2025).

2.2. BOAS PRÁTICAS NA OBTENÇÃO DO LEITE CRU

A obtenção de leite cru com qualidade adequada depende de um conjunto de práticas integradas que envolvem o manejo do rebanho, a higiene do ambiente, a saúde dos animais e a correta execução da ordenha. O leite cru é altamente perecível e vulnerável à contaminação microbiológica, o que pode comprometer sua segurança sanitária e seu valor econômico. Nesse contexto, a adoção rigorosa das boas práticas na ordenha torna-se indispensável para minimizar a introdução de microrganismos patogênicos e deteriorantes (Hora *et al.*, 2024).

Segundo Fonseca *et al.* (2025), um dos principais pilares das boas práticas na ordenha é a higiene dos equipamentos, como baldes, tanques de expansão e sistemas de ordenha mecânica. Esses utensílios devem ser submetidos a processos criteriosos de limpeza e sanitização, que assegurem a remoção completa de resíduos orgânicos e microrganismos indesejáveis. Além disso, a higienização adequada dos tetos das vacas antes da ordenha é essencial para reduzir a contaminação proveniente da pele do animal e do ambiente.

A saúde das vacas leiteiras também exerce forte influência na qualidade do leite. Vacas com mastite ou outras infecções mamárias produzem leite com elevada CCS, o que reduz tanto a qualidade quanto a vida útil do produto. Portanto, é imprescindível manter um programa de monitoramento contínuo da saúde do úbere e implementar medidas de prevenção e controle de doenças (Bruzaroski *et al.*, 2024).

Outros fatores que contribuem para a obtenção de um leite de qualidade incluem o manejo nutricional equilibrado, o controle sanitário do rebanho, o bem-estar dos animais e a redução do estresse, principalmente durante a ordenha (Cruz *et al.*, 2023). A manutenção da limpeza no local de ordenha, bem como o controle de poeira e vetores como insetos, também são fundamentais para evitar contaminações (Hora *et al.*, 2024).

O tempo de ordenha deve ser adequadamente gerenciado, assegurando uma coleta eficiente e cuidadosa, que evite a exposição prolongada do leite a temperaturas inadequadas. Após a ordenha, o leite deve ser imediatamente resfriado a temperaturas seguras, preferencialmente abaixo de 4 °C, para inibir o crescimento microbiano (Brasil, 2018a). Também é essencial evitar a contaminação cruzada entre animais, por meio do uso de panos individuais para secagem dos tetos ou da correta desinfecção entre ordenhas (Bruzaroski *et al.*, 2024).

Em sistemas de ordenha mecanizada, a manutenção preventiva dos equipamentos é indispensável para prevenir falhas que possam comprometer a integridade do leite (Maslov, 2023). A capacitação técnica dos ordenhadores e sua conscientização sobre os impactos das boas práticas na qualidade do leite são fatores-chave para garantir um processo higiênico e eficaz desde a origem (Bruzaroski *et al.*, 2024).

A aplicação de boas práticas na ordenha é uma etapa crítica dentro da cadeia produtiva do leite, com impacto direto sobre a qualidade microbiológica e físico-química do produto final. A integração entre o manejo sanitário e nutricional do rebanho, a higiene dos equipamentos, as condições ambientais e a qualificação da mão de obra são elementos essenciais para assegurar um leite cru seguro, de alta qualidade e apto ao processamento e consumo ((Fonseca; Xavier; Paiva, 2025) 2025; Ströher *et al.*, 2024a). A negligência em qualquer um desses aspectos pode acarretar prejuízos sanitários e econômicos, tanto para os produtores quanto para a indústria laticinista.

2.3. ARMAZENAMENTO DO LEITE CRU

O armazenamento adequado do leite cru é uma etapa fundamental para preservar suas características físico-químicas e microbiológicas até o momento do processamento ou comercialização, prevenindo a deterioração e o crescimento de microrganismos indesejados (Abdelmonem *et al.*, 2025).

Conforme Ströher *et al.* (2024c), os tanques de refrigeração são a principal tecnologia utilizada em propriedades e cooperativas para garantir a conservação do leite, promovendo o resfriamento rápido e uniforme. Esses equipamentos mantêm o leite próximo a 4 °C, condição ideal para retardar a proliferação microbiana e prolongar sua vida útil. A capacidade e o tipo do tanque devem ser compatíveis com o volume produzido, assegurando armazenamento seguro até a coleta ou processamento.

A limpeza e manutenção dos tanques são essenciais para evitar contaminações secundárias. Protocolos rigorosos de higienização incluem a lavagem com detergentes alcalinos, enxágue com água potável e sanitização com agentes químicos, respeitando os tempos de contato recomendados para a eficácia dos produtos. A ausência de manutenção pode levar a falhas no sistema de refrigeração, corrosão e acúmulo de resíduos, favorecendo a multiplicação bacteriana e comprometendo a qualidade do leite (Lu *et al.*, 2025).

O tempo de armazenamento deve ser minimizado, idealmente não ultrapassando 48 horas, para que o leite mantenha suas propriedades originais até o processamento. Mesmo em temperaturas adequadas, armazenamentos prolongados podem favorecer o crescimento de bactérias psicotróficas, responsáveis pela produção de enzimas que deterioram o leite mesmo após a pasteurização (Ströher *et al.*, 2024c).

Além dos cuidados com equipamentos e tempo, a capacitação dos trabalhadores no manejo correto dos tanques e a implementação de rotinas de controle de qualidade são imprescindíveis para reduzir riscos. O monitoramento constante da temperatura, análises microbiológicas regulares e avaliações sensoriais do leite armazenado são ferramentas importantes para garantir a segurança do produto até seu destino final (Abdelmonem *et al.*, 2025).

O armazenamento eficiente do leite cru é um fator decisivo para manter sua qualidade e assegurar a segurança, demandando atenção contínua à temperatura, tempo, higienização e operação dos equipamentos (Ströher *et al.*, 2024c; Fonseca; Xavier; Paiva, 2025).

2.4. ENVIO DE AMOSTRAS PARA ANÁLISE

O envio adequado de amostras de leite cru para análise laboratorial é uma etapa determinante para assegurar a confiabilidade dos resultados obtidos, refletindo com precisão as condições higiênico-sanitárias da produção. Este processo envolve cuidados rigorosos desde a coleta, passando pela correta identificação, até a conservação térmica durante o transporte (Abdelmonem *et al.*, 2025).

Quando malconduzido, pode resultar em alterações nas características microbiológicas, físico-químicas e sensoriais do leite, comprometendo o diagnóstico da qualidade e, conseqüentemente, as tomadas de decisão tanto na cadeia produtiva quanto nos processos regulatórios (Ströher *et al.*, 2024c).

O processo de coleta deve ser executado utilizando materiais estéreis, como frascos plásticos ou de vidro, devidamente higienizados e esterilizados, para evitar contaminações cruzadas. As amostras devem ser coletadas preferencialmente diretamente do tanque de expansão, após homogeneização do leite, garantindo que a amostra represente fielmente todo o volume armazenado (Ströher *et al.*, 2024c).

A identificação precisa é outro fator essencial. Devem constar na etiqueta informações como nome do produtor, número de identificação da propriedade, data e hora da coleta, além da finalidade da análise (qualidade microbiológica, composição físico-química, detecção de resíduos, entre outras). A ausência ou erros nessas informações pode gerar interpretações equivocadas dos dados e penalidades legais ((Fonseca; Xavier; Paiva, 2025) 2025).

A conservação da cadeia de frio durante o transporte das amostras é imprescindível para evitar alterações nos parâmetros microbiológicos. O ideal é que as amostras sejam acondicionadas em caixas térmicas com gelo reciclável ou gelo em gel, mantendo temperaturas entre 2 °C e 8 °C. Essa faixa térmica reduz o metabolismo bacteriano, evitando proliferação dos microrganismos presentes no leite, principalmente os psicrotróficos (Ströher *et al.*, 2024c).

Estudos recentes, como os de Niboucha *et al.* (2025), apontam que elevações de temperatura acima de 10 °C durante o transporte podem levar ao crescimento exponencial de bactérias, mascarando os resultados das análises e, muitas vezes, simulando falsamente um problema na produção quando, na verdade, trata-se de uma falha na logística da amostra.

Além disso, é recomendado que as caixas térmicas sejam resistentes, de fácil higienização, e que os elementos refrigerantes sejam colocados de forma a evitar contato

direto com os frascos, prevenindo congelamento das amostras, o que também pode comprometer as análises, especialmente as físico-químicas (Ströher *et al.*, 2024c).

O tempo entre a coleta e a realização da análise laboratorial deve ser o menor possível. A legislação brasileira, por meio da IN nº 77/2018 do Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), estabelece que as amostras devem ser analisadas preferencialmente em até 48 horas após a coleta, desde que sejam mantidas em condições térmicas adequadas. Caso esse prazo não seja respeitado, há risco de degradação dos componentes do leite e multiplicação de microrganismos, interferindo na precisão dos resultados (Brasil, 2018b).

Portanto, o sucesso na avaliação laboratorial do leite cru está diretamente relacionado à adoção de boas práticas na coleta, na conservação e no transporte das amostras. A implementação desses procedimentos assegura a rastreabilidade dos dados e a tomada de decisões assertivas na cadeia produtiva, impactando positivamente tanto na qualidade do leite como na segurança alimentar dos consumidores (Lu *et al.*, 2022).

2.5. AVALIAÇÃO DO LEITE CRU

A avaliação do leite cru é fundamental para assegurar a qualidade e segurança do produto antes do processamento e comercialização. Essa análise abrange parâmetros físico-químicos, microbiológicos e sensoriais que ajudam a identificar contaminações, adulterações ou alterações que possam comprometer o leite e seus derivados (Azevedo Câmara *et al.*, 2024).

Entre os principais indicadores, destacam-se a CPP e a CCS. A CPP reflete o nível de contaminação microbiológica e, quando elevada, indica falhas na higiene durante a ordenha, armazenamento ou transporte, aumentando o risco de deterioração e ameaças à saúde do consumidor (Delfino *et al.*, 2024). Já a CCS aponta a saúde da glândula mamária e a possível presença de mastite subclínica, que afeta a qualidade do leite e gera prejuízos econômicos (Souza *et al.*, 2021).

Parâmetros físico-químicos, como teor de gordura, proteína, lactose e sólidos totais, são avaliados para garantir conformidade com padrões legais e comerciais. O teor de gordura, por exemplo, influencia diretamente a classificação do leite e o rendimento na produção de derivados lácteos (Azevedo Câmara *et al.*, 2024). A lactose e os sólidos totais indicam a composição do leite e ajudam a identificar adulterações, como diluição por água ou remoção de componentes. O monitoramento rigoroso de resíduos de antibióticos e contaminantes

químicos é imprescindível para evitar riscos toxicológicos e rejeição do produto (Bartolomeu *et al.*, 2024; Costa *et al.*, 2019).

Testes sensoriais, avaliando odor, sabor e aspecto visual, complementam a triagem inicial, podendo indicar contaminação por microrganismos ou a presença de substâncias estranhas. A combinação dessas análises possibilita uma avaliação completa da qualidade do leite cru, fornecendo informações essenciais para o manejo da produção e garantindo a segurança da matéria prima (Geetha, 2024). É importante que essas avaliações sejam realizadas periodicamente, utilizando métodos padronizados e equipamentos calibrados para assegurar resultados confiáveis e reprodutíveis ((Fonseca; Xavier; Paiva, 2025) 2025).

2.6. NORMAS E LEGISLAÇÕES VIGENTES

A regulamentação da cadeia produtiva do leite, tanto no Brasil quanto internacionalmente, tem como objetivo garantir a qualidade e a segurança do leite cru destinado à indústria e ao consumidor final. Essa normatização abrange todos os estágios, desde a produção, obtenção, armazenamento e transporte, até os padrões específicos de qualidade e identidade do produto (Nascimento *et al.*, 2024).

No Brasil, destacam-se as IN nº 76 e nº 77, ambas de 26 de novembro de 2018, emitidas pelo MAPA. A IN nº 76/2018 estabelece os requisitos para produção, identidade e qualidade do leite cru refrigerado, pasteurizado e do leite tipo A, incluindo critérios como temperatura de conservação, limites microbiológicos e padrões físico-químicos. Por sua vez, a IN nº 77/2018 regulamenta os procedimentos de fiscalização, as exigências quanto às instalações e equipamentos, além do plano de qualificação dos fornecedores (Brasil, 2018a,b).

A legislação também determina critérios rigorosos para o transporte do leite cru, exigindo o uso de tanques isotérmicos devidamente higienizados, capazes de manter a temperatura adequada até a chegada ao laticínio. Impõe requisitos para a capacitação dos produtores, assistência técnica, controle sanitário do rebanho e a implementação de programas de boas práticas agropecuárias (BPA) ((Fonseca; Xavier; Paiva, 2025) 2025).

Em propriedades de pequeno e médio porte, onde o transporte em tanques resfriados não é viável, a entrega do leite cru em galões é comum. Nesses casos, a legislação permite a ausência de refrigeração durante o transporte, desde que o leite seja entregue à indústria em até duas horas após a ordenha. Para garantir a segurança do produto, é fundamental que os galões sejam fabricados com materiais adequados, resistentes e higienizados rigorosamente

antes do uso. O correto manuseio e o transporte ágil contribuem para preservar a qualidade do leite, mesmo sem refrigeração durante o trajeto (Brasil, 2018a; (Fonseca; Xavier; Paiva, 2025) 2025). O descumprimento dessas normas pode acarretar penalidades que vão desde advertências e multas até interdições e suspensão do fornecimento (Oliveira *et al.*, 2020).

Por fim, é importante destacar que as normas são periodicamente atualizadas, acompanhando avanços científicos, tecnológicos e as demandas dos mercados. Os parâmetros gerais de avaliação estão apresentados no Quadro 1.

Quadro 1. Parâmetros legais para a qualidade do leite cru segundo a IN 77 e 76 de 2018.

Parâmetro*	Unidade	Limite Máximo	Observações
Contagem Bacteriana Total (CPP)	UFC/mL	300.000	Indica contaminação microbiológica
Contagem de Células Somáticas (CCS)	células/mL	400.000	Indica saúde da glândula mamária
Teor de gordura	g/100g	Mínimo 3,0	Importante para qualidade
Proteína	g/100g	Mínimo 2,9	Importante para qualidade
Lactose	g/100g	Aproximadamente 4,5	Indicador de integridade do leite
Sólidos Totais	g/100g	Mínimo 11,4	Composição geral do leite
Sólidos não gordurosos	g/100g	Mínimo de 8,4	Composição geral do leite
Resíduos de antibióticos	—	Não detectável / Proibido	Segurança alimentar
Temperatura de armazenamento	°C	≤ 4	Conservação adequada
Capacitação e boas práticas	—	Implementação obrigatória de BPA e qualificação dos fornecedores	Capacitação e boas práticas

*Adaptado de Brasil 2018a e b.

A avaliação dos parâmetros estabelecidos na legislação é realizada de forma periódica para garantir que o leite cru produzido atenda aos padrões exigidos de qualidade e segurança (Brasil, 2018 a,b). Essa fiscalização contínua permite a identificação rápida de desvios e a adoção de medidas corretivas, assegurando a conformidade legal e protegendo a saúde do consumidor. Dessa forma, produtores, técnicos e indústrias devem manter-se constantemente atualizados e comprometidos com as boas práticas, garantindo a sustentabilidade da atividade leiteira e a segurança alimentar (Oliveira *et al.*, 2020).

2.7. IMPACTO DA QUALIDADE DO LEITE NA INDÚSTRIA E NO CONSUMIDOR

A qualidade do leite cru impacta diretamente toda a cadeia produtiva, desde os produtores até a indústria de laticínios e, finalmente, o consumidor. Por ser uma matéria-prima altamente perecível, a integridade físico-química, microbiológica e sanitária do leite afeta não só o rendimento industrial, mas também a segurança alimentar e a saúde pública. Dessa forma, garantir leite de alta qualidade não é apenas uma exigência legal, mas uma necessidade econômica e sanitária (Pascoal *et al.*, 2025).

Na indústria, a utilização de leite com elevada contagem bacteriana ou altos índices de células somáticas prejudica os processos de transformação, como a fabricação de queijos, iogurtes e leite pasteurizado. Altas contagens bacterianas podem provocar fermentações indesejadas, alterações no sabor, na textura e reduzir o rendimento dos derivados lácteos. Além disso, níveis elevados de CCS estão relacionados à alteração na composição proteica, afetando a estabilidade e a qualidade dos produtos finais (Niboucha *et al.*, 2025).

Do ponto de vista econômico, leite fora dos padrões de qualidade gera perdas significativas. Indústrias que recebem leite com CPP ou CCS acima do permitido precisam investir mais em pasteurização, controle microbiológico e descarte de lotes irregulares. Isso aumenta os custos operacionais com insumos, controle de qualidade e manutenção de equipamentos. Para os produtores, a baixa qualidade impacta o preço pago pelo leite, pois muitas indústrias adotam políticas de pagamento por qualidade, com bonificações para lotes adequados e penalidades para os que não cumprem os padrões (Lu *et al.*, 2022; (Fonseca; Xavier; Paiva, 2025) 2025).

Para o consumidor, a qualidade do leite está diretamente ligada à segurança alimentar. Leite contaminado por microrganismos patogênicos, resíduos de antibióticos, aflatoxinas ou outros contaminantes representa riscos à saúde pública, podendo causar desde intoxicações alimentares até alergias, resistência antimicrobiana e doenças crônicas. Garantir a qualidade do leite cru é, portanto, essencial para proteger a saúde coletiva e fortalecer a confiança do consumidor nos produtos lácteos (Pascoal *et al.*, 2025).

A qualidade do leite influencia a sustentabilidade da cadeia produtiva. Processos produtivos eficientes, com redução de perdas, otimização do uso de recursos e geração de produtos de maior valor agregado, estão ligados à obtenção de leite dentro dos padrões sanitários. A rastreabilidade, certificações de qualidade e práticas sustentáveis têm se tornado

requisitos cada vez mais importantes para os mercados interno e externo, afetando a competitividade dos produtos brasileiros internacionalmente (Weis *et al.*, 2022).

A integração entre produtores, técnicos, indústria e órgãos de fiscalização é fundamental para assegurar a produção de leite de alta qualidade. A implementação de programas de BPA, assistência técnica contínua, investimentos em tecnologia e educação sanitária dos produtores são estratégias indispensáveis. O fortalecimento da cadeia leiteira sustentável depende diretamente da manutenção de padrões rigorosos que atendam às exigências do mercado e garantam um alimento seguro e nutritivo para a população (Weis *et al.*, 2022).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adoção rigorosa das boas práticas na obtenção e coleta de leite para fins de análise é essencial para garantir a qualidade e segurança do produto em toda a cadeia produtiva. Desde a qualidade do leite na origem até o impacto final na indústria e no consumidor, cada etapa descrita neste capítulo, incluindo a ordenha higiênica, o armazenamento adequado, o transporte controlado e a conformidade com as legislações vigentes, desempenha um papel determinante na fidelidade dos resultados analíticos e na valorização do leite como matéria-prima. A correta execução desses procedimentos não apenas assegura a integridade das amostras encaminhadas para análise laboratorial, como também contribui para o fortalecimento da confiança entre produtores, técnicos, indústrias e consumidores. Além disso, práticas bem fundamentadas promovem melhorias contínuas na produtividade, na saúde animal e na sustentabilidade do setor leiteiro.

REFERÊNCIAS

- ABDELMONEM, Y. et al. Receiving and storage aspects for food highlighting for milk and dairy products. **ResearchGate**, v.1, p.1-25, 2025.
- AZEVEDO CÂMARA, L. R. et al. Indicadores higiênico-sanitários e de qualidade do leite bovino em propriedades rurais da microrregião de Frutal/MG. **Ciência ET Praxis**, v. 19, n. 34, p. 83–98, 2024.
- BARTOLOMEU, L. D. C. R. et al. Identificação de resíduo de droga veterinária macrolídia em vacas de leite. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 5, p. e3614, 2024. DOI: <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n5-104>
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 76, de 26 de novembro de 2018. Regulamentos técnicos que fixam a identidade e as características de qualidade que devem apresentar o leite cru refrigerado, o leite pasteurizado e o leite pasteurizado tipo A. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 9, 30 nov. 2018a.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 77, de 26 de novembro de 2018. Instrui critérios e procedimentos para a produção, acondicionamento, conservação, transporte, seleção e recepção do leite cru em estabelecimentos registrados no serviço de inspeção oficial. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 9, 30 nov. 2018b.
- BRUZAROSKI, S. R.; CARVALHO, R. C. T.; DE SANTANA, E. H. W. Avaliação das práticas de produção e qualidade microbiológica de lácteos em comunidade rural do Mato Grosso. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 28, n. 3, p. 415–420, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17921/1415-6938.2024v28n3p415-420>.
- COSTA, A. et al. Milk lactose: current status and future challenges in dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, v. 102, n. 7, p. 5883–5898, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15955>.
- CRUZ, J. da C. C. et al. Mastite em bovinos de leite: bem-estar animal e aspectos forenses relacionados. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 1, p. 419-426, 2023. DOI: <https://doi.org/10.51891/rease.v1i1.10533>
- DELFINO, J. L. C. et al. Aspectos que influenciam a contagem bacteriana total e a contagem de células somáticas do leite de propriedades rurais do interior do estado de São Paulo, Brasil. **Veterinária e Zootecnia**, v. 31, p. 1–12, 2024. DOI: <https://doi.org/10.35172/rvz.2024.v31.1554>
- FONSECA, J. da; XAVIER, P. O. M.; PAIVA, L. F. de. Comparação microbiológica entre leites crus e leites pasteurizados adquiridos de propriedades rurais e do comércio local do município de Senador Amaral, Minas Gerais. **Segurança Alimentar e Nutricional**, v. 31, p. e024015, 2025. DOI: <https://doi.org/10.20396/san.v31i00.8676985>.

- GEETHA, G. Avaliação da qualidade de diferentes tipos de leite comercializado e leite cru. **Revista Internacional de Ciência, Tecnologia e Engenharia**, v. 12, n. 11, p. 656–670, 2024. DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.65061>
- HORA, R. N. S. et al. Avaliação da qualidade do leite e eficácia das ações de boas práticas de manejo entre agricultores familiares no município de Irajuba - Bahia. **Revista Macambira**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.35642/rm.v8i1.1348>.
- JIMÉNEZ, M. E. et al. Características socioeconômicas da produção e parâmetros de qualidade do leite cru refrigerado no Município de Santa Maria, RS, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 6, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i6.15562>
- LOPES, C. A. et al. Influência das boas práticas agropecuárias na contagem padrão em placas (CPP) e na contagem de células somáticas (CCS) no leite cru/ influence of good agricultural practices on standard plate count (SPC) and somatic cell count (SCC) in raw cow milk. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 3, p. 21519–21536, 2022. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv8n3-383>
- LU, H. et al. The effects of sampling sites, collection time, and refrigerated storage duration on microbiota of raw milk from a Chinese dairy farm: an exploratory study. **Journal of Food Protection**, v.88, n.6, p. 100504, 2025. DOI: [10.1016/j.jfp.2025.100504](https://doi.org/10.1016/j.jfp.2025.100504).
- LU, M. et al. Microbial properties of raw milk throughout the year and their relationships to quality parameters. **Foods**, v.11, n.19, p. 3077, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11193077>
- NASCIMENTO, M. D. P. S. do et al. Prospeção da cadeia produtiva do leite no Brasil: panorama histórico, impactos e desafios. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 4, p. e4421, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv22n4-226>
- NIBOUCHA, N. et al. Cold storage promotes the emergence and proliferation of multi-species biofilms in raw milk. **ScienceDirect**, v.166, p. 106244, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2025.106244>
- MASLOV, M. M. Avaliação da confiabilidade de máquinas de ordenha com base na análise de suas falhas. **Engenharia Agrícola**, n. 1, p. 23–27, 2023.
- OLIVEIRA, P. V. C. et al. Avaliação da qualidade do leite cru e prevalência de mastite no município de Mossoró-RN. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 64027–64042, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n8-728>
- PASCOAL, S. V. et al. Avaliação retrospectiva na qualidade de leite cru proveniente de Rondônia Amazônia Ocidental. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 23, n. 3, p. e9237, 2025. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv23n3-044>
- SARODE, A. R. et al. Milk: Role in the Diet. Em: [S. l.: s. n.], 2016. p. 736–740. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00462->

CAPÍTULO X

DIVERSIDADE DE PIMENTAS EM PROPRIEDADE RURAL DE ALTA FLORESTA - MT

DIVERSITY OF PEPPERS IN HIGH FOREST RURAL PROPERTY- MT

DOI: 10.51859/amplla.mac6200-10

Heloisa Grecco Guedes¹

Henrique Tres¹

Julia Mônica Marques¹

Maria Eduarda Cardoso¹

Willian Diniz dos Santos¹

Isane Vera Karsburg²

¹ Graduando (a), bacharelado em Agronomia- Universidade do Estado de Mato Grosso – Campus de Alta Floresta- MT

² Professora Adjunta da Universidade do Estado de Mato Grosso – Campus Alta Floresta – MT.

RESUMO

O estudo analisou a diversidade de pimentas cultivadas na propriedade Nossa Senhora de Aparecida, localizada no município de Alta Floresta-MT, as quais são colhidas e comercializadas na Feira Municipal Odílio Oliveira de Paula. As pimentas pertencem ao gênero *Capsicum* e possuem grande relevância econômica, cultural e gastronômica, sendo amplamente cultivadas por agricultores familiares em diferentes regiões do Brasil. A pesquisa foi desenvolvida por meio de uma visita técnica à propriedade rural abrangendo a Feira Livre, observando de forma direta as espécies cultivadas, a forma de comercialização e preferência dos consumidores. Durante o levantamento, foram possíveis identificar as variedades, tais como a malagueta (*Capsicum frutescens*), cumari (*Capsicum baccatum*), pimenta doce (*Capsicum annuum*) e pimenta de cheiro (*Capsicum chinense*). Entre as observadas, a cultivar que houve destaque foram a malagueta e a cumari devido a sua pungência, é amplamente procurada e de maior valorização comercial. Já a pimenta doce e a pimenta de cheiro apresentaram boa aceitação entre consumidores que preferem sabores mais suaves e aromático. Conclui-se que a produção e comercialização dessa espécie, apresenta importância na fonte de renda do produtor rural, contribuindo para o fortalecimento da agricultura familiar, valorização dos produtos regionais e a preservação da diversidade genética.

Palavras-chave: *Capsicum*, Pungência, Variedade, Economia Local, Comercialização.

ABSTRACT

The study analyzed the diversity of peppers grown on the Nossa Senhora de Aparecida property, located in the municipality of Alta Floresta-MT, which are harvested and marketed at the Odílio Oliveira de Paula Municipal Fair. Peppers belong to the genus *Capsicum* and have great economic, cultural and gastronomic relevance, being widely cultivated by family farmers in different regions of Brazil. The research was developed through a technical visit to the rural property covering the Feira Livre, directly observing the cultivated species, the form of marketing and consumer preference. During the survey, it was possible to identify the varieties, such as chili pepper (*Capsicum frutescens*), cumari (*Capsicum baccatum*), sweet pepper (*Capsicum annuum*) and smell pepper (*Capsicum chinense*). Among those observed, the cultivar that was highlighted were the chili pepper and the cumari due to its pungentness, it is widely sought after and of greater commercial appreciation. Sweet pepper and smell pepper, on the other hand, showed good acceptance among consumers who prefer softer and more aromatic flavors. It is concluded that the production and marketing of this species is important in the source of income of the rural producer, contributing to the strengthening of family agriculture, valorization of regional products and the preservation of genetic diversity.

Keywords: *Capsicum*, Pungency, Variety, Local Economy, Marketing.

1. INTRODUÇÃO

As pimentas pertencem ao gênero *Capsicum*, integrante da família Solanaceae, sendo originárias do continente americano, principalmente das regiões da América Central e América do Sul. Estudos arqueológicos indicam que as espécies do gênero *Capsicum* já eram utilizadas por povos indígenas há mais de 6 mil anos, tanto na alimentação quanto para fins medicinais e culturais. Atualmente, as pimentas encontram-se distribuídas em diversas regiões do mundo, apresentando ampla diversidade genética e grande importância econômica, culinária e cultural (CARVALHO; BIANCHETTI; RIBEIRO; LOPES, 2006).

O gênero *Capsicum* apresenta aproximadamente 35 espécies conhecidas, das quais cinco são consideradas domesticadas e amplamente cultivadas: *Capsicum annuum*, *Capsicum frutescens*, *Capsicum chinense*, *Capsicum baccatum* e *Capsicum pubescens*. Essas espécies diferenciam-se quanto ao formato, tamanho, coloração, aroma, pungência e adaptação climática, sendo utilizadas tanto para consumo in natura quanto para produção de conservas, molhos, temperos e produtos industrializados (REIFSCHNEIDER, 2000).

No Brasil, o cultivo de pimentas possui expressiva relevância econômica, principalmente entre agricultores familiares. O país apresenta condições climáticas favoráveis ao desenvolvimento das diferentes espécies de *Capsicum*, permitindo a produção em praticamente todas as regiões. Além da importância gastronômica, as pimentas possuem compostos bioativos, como a capsaicina, responsável pela sensação de pungência e associada a propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e medicinais. Dessa forma, o consumo desses frutos vem crescendo tanto no mercado nacional quanto internacional (RIBEIRO *et al*, 2008).

No estado de Mato Grosso, especialmente no município de Alta Floresta, o cultivo de pimentas é bastante difundido em pequenas propriedades rurais, sendo uma importante alternativa de geração de renda para agricultores familiares. Entre as variedades mais cultivadas e comercializadas destacam-se a pimenta malagueta (*Capsicum frutescens*), a pimenta cumari (*Capsicum baccatum*), a pimenta doce (*Capsicum annuum*) e a pimenta de cheiro (*Capsicum chinense*), variedades amplamente utilizadas na culinária regional devido às características de sabor, aroma e pungência (CARVALHO; BIANCHETTI; RIBEIRO; LOPES, 2006).

A comercialização ocorre principalmente na Feira Municipal Odílio Oliveira de Paula em Alta Floresta - MT, local que representa importante espaço de integração entre produtores

e consumidores, favorecendo a valorização dos produtos regionais e fortalecendo a agricultura familiar.

Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo identificar as principais variedades de pimentas cultivadas no Sítio Nossa Senhora de Aparecida e analisar as variedades mais comercializadas na Feira Municipal de Alta Floresta - MT.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo caracterizou-se como uma pesquisa descritiva, qualitativa e exploratória, realizada no Sítio Nossa Senhora de Aparecida, localizado na Estrada Vicinal Primeira Oeste, Comunidade Paraíso, no município de Alta Floresta, estado de Mato Grosso.



No dia 20 de abril de 2026, foi realizada uma visita à feira livre e na propriedade, com o objetivo de identificar quais variedades de pimentas são mais cultivadas e comercializadas, bem como suas principais finalidades de uso na região.

A coleta de dados ocorreu por meio de visitas ao local de cultivo, observações diretas das variedades produzidas com o proprietário do sítio responsável, tanto pela produção quanto pela comercialização das pimentas na feira livre municipal Odílio Oliveira de Paula.

A pesquisa do mercado da pimenta de Alta Floresta, incluindo a feira livre e a propriedade, aponta que a pimenta de cheiro e doce, e pimentas ardidas Malagueta e Cumari são as mais vendidas e de maior preferência geral.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. ESPÉCIES DE PIMENTAS CULTIVADAS

Durante a pesquisa foram identificadas diferentes variedades de pimentas cultivadas no Sítio Nossa Senhora de Aparecida, destacando-se as variedades malagueta, cumari, pimenta doce e pimenta de cheiro.

A pimenta malagueta (fig. 1) apresentou elevada aceitação comercial devido à intensa pungência e ao aroma característico, sendo amplamente utilizada na produção de conservas e molhos artesanais. Essa variedade possui forte demanda entre os consumidores da feira livre.

Figura 15: Pimenta Malagueta (*Capsicum frutescens*)



Fonte: Autoria própria.

A pimenta cumari (fig. 2) destacou-se pela elevada pungência e pelo sabor levemente amargo, sendo bastante procurada por consumidores que apreciam pimentas mais fortes. Além disso, essa variedade apresenta boa adaptação às condições climáticas da região.

Figura 16: Pimenta Cumari (*Capsicum baccatum*)



Fonte: Autoria própria.

A pimenta doce (fig. 3) apresentou grande aceitação por consumidores que preferem sabor suave e ausência de pungência. Essa variedade é frequentemente utilizada em refogados, saladas e pratos regionais.

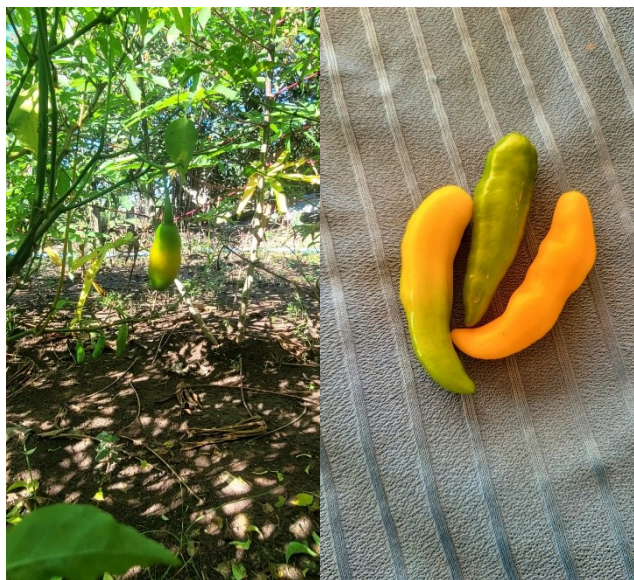
Figura 17: Pimenta Doce (*Capsicum annuum*).



Fonte: Autoria própria.

Já a pimenta de cheiro (fig. 4) apresentou valorização comercial devido ao aroma intenso e agradável, sendo utilizada principalmente no preparo de temperos e pratos típicos da culinária regional.

Figura 18: Pimenta de Cheiro (*Capsicum chinense*).



Fonte: Autoria própria.

3.2. COMERCIALIZAÇÃO DAS PIMENTAS NA FEIRA LIVRE

Observou-se que a feira livre de Alta Floresta - MT representa importante espaço de comercialização para os pequenos produtores rurais da região. O proprietário do Sítio Nossa Senhora de Aparecida atua diretamente na venda das pimentas produzidas na propriedade, estabelecendo relação direta entre produtor e consumidor.

A comercialização das variedades malagueta, cumari, pimenta doce e pimenta de cheiro contribui significativamente para a geração de renda familiar, fortalecendo a agricultura familiar e promovendo a valorização dos produtos regionais.

Outro aspecto relevante identificado foi a preferência dos consumidores por produtos frescos e produzidos localmente, fator que favorece a procura pelas pimentas comercializadas na feira livre.

A diversidade de variedades cultivadas também contribui para a preservação dos recursos genéticos do gênero *Capsicum*, além de incentivar a continuidade da produção agrícola familiar no município.

4. CONCLUSÃO

Portanto o estudo permitiu identificar as principais espécies de pimentas cultivadas no Sítio Nossa Senhora de Aparecida e comercializadas na feira livre de Alta Floresta - MT, destacando-se as variedades malagueta, cumari, pimenta doce e pimenta de cheiro pela elevada aceitação comercial e importância gastronômica regional. Observou-se ainda que o proprietário do sítio é responsável tanto pela produção quanto pela comercialização das pimentas, fortalecendo a agricultura familiar e promovendo maior valorização econômica dos produtos locais. Além da conservação da diversidade genética de pimentas. Dessa forma, o cultivo de pimentas representa também uma importante atividade econômica para pequenos produtores rurais, contribuindo para a geração de renda, fortalecimento da economia local e preservação da diversidade agrícola regional.

REFERÊNCIAS

- CARVALHO, S. I. C; BIANCHETTI, L. B; RIBEIRO, C. S. C; LOPES, C. A. Pimentas do Gênero *Capsicum* no Brasil. Brasília, DF: **Embrapa Hortaliças**, 2006. 27 p.
- RIBEIRO, C. S. da C. *et al.* **Pimentas Capsicum**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2008. 200 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/781198>. Acesso em: 13 maio 2026.
- REIFSCHNEIDER, F. J. B. *Capsicum: pimentas e pimentões no Brasil*. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 2000.

CAPÍTULO XI

ARBORIZAÇÃO DE PRAÇAS EM CONTEXTOS URBANOS: UMA REVISÃO NARRATIVA EM UMA CAPITAL DA AMAZÔNIA BRASILEIRA

URBAN SQUARE ARBORIZATION IN URBAN CONTEXTS: A NARRATIVE REVIEW IN A BRAZILIAN AMAZONIAN CAPITAL

DOI: 10.51859/amplla.mac6200-11

Paula Daniele Martins Moraes¹

Brenda Rayana Ferreira da Silva²

Marcele Farias Pereira³

Vitoria Luiza dos Passos⁴

Ricardo Christin Lobato Machado¹

Hiago Felipe Cardoso Pacheco⁵

Francisco de Assis Oliveira⁶

¹ Doutorando(a) em Ciências Florestais. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais– UFRA

² Mestranda em Ciências Ambientais. Instituto Tecnológico Vale – ITV

³ Mestre em Ciências Florestais. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais– UFRA

⁴ Mestranda em Ciências Florestais. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais– UFRA

⁵ Doutorando em Ciência Florestal. Universidade Federal de Viçosa – UFV

⁶ Professor da Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

RESUMO

A intensificação das mudanças climáticas e da urbanização tem ampliado a necessidade de estratégias capazes de melhorar a qualidade ambiental das cidades. Nesse contexto, a arborização de praças destaca-se por sua contribuição para o conforto térmico, conservação da biodiversidade e promoção do bem-estar da população. O presente estudo teve como objetivo realizar uma revisão narrativa sobre a arborização de praças em contextos urbanos, com enfoque na cidade de Belém, Pará, capital da Amazônia brasileira. A pesquisa foi desenvolvida por meio da análise de literatura científica e documentos técnicos relacionados à importância das praças urbanas, aos critérios de seleção de espécies arbóreas, às problemáticas associadas ao planejamento desses espaços e à utilização de avaliações florísticas como suporte à gestão urbana. A revisão evidenciou que a arborização de praças desempenha papel fundamental na oferta de serviços ecossistêmicos, na mitigação das ilhas de calor e na valorização dos espaços públicos. Também foram identificados desafios relacionados ao manejo inadequado, à presença predominante

de espécies exóticas e às desigualdades na distribuição da cobertura vegetal urbana. Conclui-se que o planejamento técnico, aliado à avaliação florística e à valorização de espécies adaptadas às condições locais, constitui uma ferramenta essencial para o fortalecimento da sustentabilidade e da resiliência ambiental em centros urbanos amazônicos.

Palavras-chave: Microclima. Paisagismo. Conservação. Resiliência. Ecossistemas.

ABSTRACT

The intensification of climate change and urbanization has reinforced the need for strategies capable of improving environmental quality in cities. In this context, the arborization of public squares stands out for its contribution to thermal comfort, biodiversity conservation, and the promotion of human well-being. This study aimed to conduct a narrative review of urban square arborization, focusing on the city of Belém, Pará, a capital located in the Brazilian Amazon. The research was developed through the analysis of scientific literature and technical documents



addressing the importance of urban squares, criteria for tree species selection, challenges associated with the planning of these spaces, and the use of floristic assessments as a tool to support urban management. The review highlighted that the arborization of public squares plays a fundamental role in providing ecosystem services, mitigating urban heat island effects, and enhancing public spaces. Challenges related to inadequate management practices, the predominance of exotic

species, and inequalities in the distribution of urban green cover were also identified. It is concluded that technical planning, combined with floristic assessment and the promotion of species adapted to local conditions, constitutes an essential tool for strengthening sustainability and environmental resilience in Amazonian urban centers.

Keywords: Microclimate. Landscaping. Conservation. Resilience. Ecosystems.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a crise climática global tem se intensificado, com seus efeitos adversos tornando-se mais evidentes em áreas urbanas, onde a antropização predomina e a presença de vegetação é reduzida (Huang *et al.*, 2025; Das *et al.*, 2024). No Brasil, o efeito urbano, aliado a uma baixa arborização, constitui um alerta para o aumento das temperaturas (Ribeiro *et al.*, 2025; Monteiro *et al.*, 2020). De acordo com dados da Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos (NOAA, 2025), o país registrou uma temperatura 0,3 °C acima da média. Diante desse cenário, observa-se a necessidade de mitigar os efeitos das crises climáticas, com o objetivo de melhorar o bem-estar e a qualidade de vida no ambiente urbano (Pandey *et al.*, 2023).

A arborização urbana constitui uma ferramenta essencial para a melhoria da qualidade de vida nas cidades, sendo capaz de mitigar ilhas de calor, poluição atmosférica e a sensação de desconforto térmico em áreas urbanas (Souza *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2013). Entre os espaços verdes, as praças destacam-se como exemplos de áreas de lazer e biodiversidade florística, capazes de proporcionar resfriamento e sombreamento em grandes centros urbanos (Silva *et al.*, 2020; Neto *et al.*, 2024; Aoki *et al.*, 2024). Em Belém, capital situada na Amazônia brasileira, mais de 55% da população urbana reside em áreas desprovidas de espaços arborizados (IBGE, 2022). Esse quadro revela-se particularmente preocupante em uma cidade onde as temperaturas atingem recordes de 37,9 °C durante o período seco (Inmet, 2024).

É de suma importância fomentar estudos sobre a arborização urbana, a fim de promover práticas alinhadas ao décimo primeiro Objetivo de Desenvolvimento Sustentável, que trata da construção de centros urbanos e coletividades mais resilientes, inclusivas e ambientalmente equilibradas. Nesse contexto, o objetivo desse estudo foi realizar uma

revisão de literatura sobre a arborização de praças em contextos urbanos, com enfoque em Belém, PA, uma capital da Amazônia brasileira.

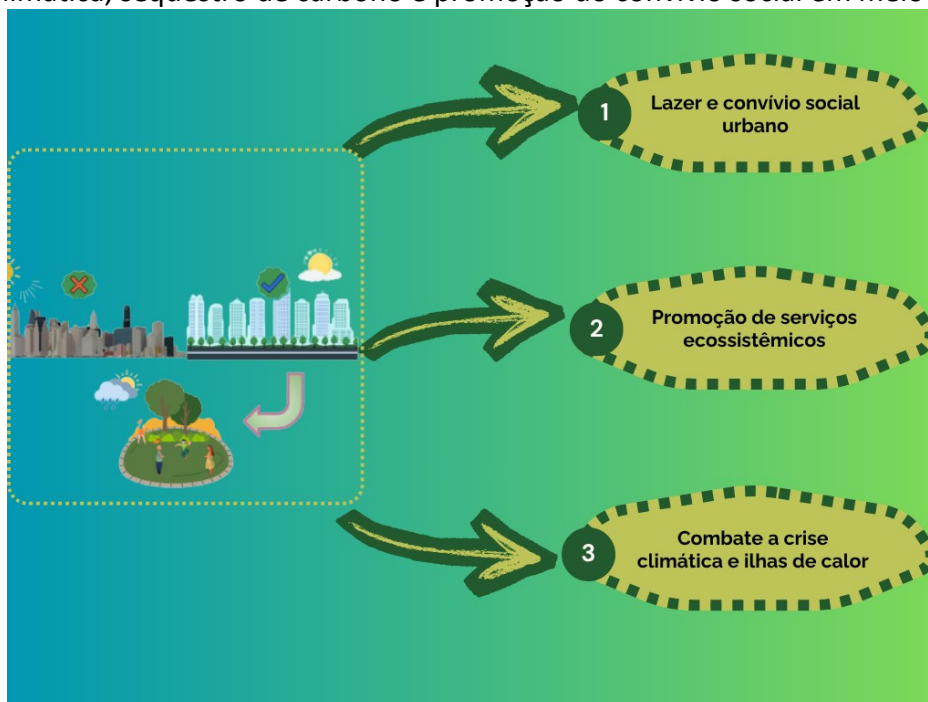
2. PRAÇAS NO CONTEXTO URBANO: IMPORTÂNCIA E DEFINIÇÃO

Praças são espaços públicos urbanos, que apresentam como principal papel e qualidade distintiva fundamental, o desenvolvimento constante das cidades e a necessidade de promoção de convivência e interações entre comunidades no ambiente urbano (Pippi & Lautert, 2019). As praças são importantes para a arquitetura e paisagística, que além de ser um local representativo para lazer do meio urbano, é um ambiente de confraternização, no qual as vegetações lenhosas inseridas são capazes de propiciar um vantajoso auxílio psicológico para saúde mental dos usuários, pelos serviços ecossistêmicos e recreativos, como conforto térmico, melhoria da qualidade de ar, sequestro de carbono e outros benefícios (Ecker, 2020; Shackleton *et al.*, 2018; Shackleton *et al.*, 2015).

Praças são caracterizadas pela reunião de pessoas em um espaço urbano, na qual traz interação, sendo no Brasil, a existência de praças, uma indicação do desenvolvimento de cidades, pela modificação antrópica na área antes natural, em ambientes planejados para benefício humano (Maciel & Barbosa, 2015). Historicamente, a cidade de Belém passou por alterações em seu perfil urbano, durante a fase da borracha, com a extração do látex (Andrade, 2013), sendo assim, espaços públicos como as praças, tiveram alterações feitas durante a administração de Antônio Lemos, para proporcionar uma estética mais semelhante às vegetações encontradas no ambiente parisiense (Neto, 2013).

A arborização em praças, em seu histórico, tem como papel desempenhar funções de amenizações climáticas, conforto urbano e preservação ambiental (Silva *et al.*, 2019). Por isso, a arborização de praças é necessária para o meio urbano, sendo essencial para a boa disposição e bem-estar humano, caracterizando-se como uma medida preventiva de doenças, pois além da estética, proporciona benefícios mentais, sociais e ambientais (Zamproni *et al.*, 2019). A ligação com a biodiversidade, que a vegetação pode proporcionar, ajuda a combater ilhas de calor, e proporciona um valor mais agregado às ambientações, como propriedades ao seu redor (Morgenroth *et al.*, 2016).

Figura 1 – Representação esquemática das principais funções ecológicas e sociais atribuídas à arborização de praças, com destaque para os serviços ecossistêmicos de regulação microclimática, sequestro de carbono e promoção do convívio social em meio urbano.



Fonte: Autoria própria.

O planejamento das praças é essencial para o bem-estar da população e para precaver de possíveis danos econômicos e ambientais no contexto urbano (Wang, 2022). Nesse sentido, a manutenção e implantação adequadas da arborização nas praças é importante, especialmente porque as limitações de espaço para esse planejamento exigem um cuidado maior na longevidade arbórea no local, pois uma gestão precária ocasiona em prejuízos socioeconômicos, como acidentes causados por uma implantação incorreta da árvore, que pode acarretar a morte e queda de árvores em decorrência de uma curadoria inadequada de profissionais que trabalham na área (Tabela 1) (Charkraborty *et al.*, 2022).

Ademais, relativo ao planejamento das praças, é necessário não subestimar o manejo e controle dos polinizadores das espécies, haja vista que a ausência de polinizadores, ocasionado por uma poda mal planejada ou uso intensivo de herbicidas e inseticidas, na arborização urbana provoca uma perda de diversidade arbórea, assim como o crescimento de parasitas, doenças e problemáticas que influenciam o ecossistema e clima local (Aronson *et al.*, 2017; Vanbergen *et al.*, 2013; Cameron & Sadd, 2020).

Outrossim, a presença de vulnerabilidades sociais, como a ocupação de praças por populações em situação de rua, pode influenciar a percepção de segurança entre os frequentadores nesses espaços verdes (Lo & Jim, 2010; Torres *et al.*, 2013). Da mesma forma,

o consumo de álcool e outras substâncias, associado ao descarte inadequado de lixo, torna esses espaços menos atrativos à população, sobretudo em bairros periféricos (Tabela 1) (Hong *et al.*, 2018; Plane & Klodawsky, 2013; He & Zhu, 2018; Farahani & Maller, 2019; Mak & Jim, 2018).

Além disso, a falta de sombreamento em espaços verdes urbanos prejudica a presença de frequentadores, principalmente idosos, pois o calor intenso no microclima do ambiente inibe a presença de visitantes, visto que é preferível estar em locais que oferecem uma qualidade arbórea necessária para um bem-estar climático (Kabisch & Haase, 2014; Buchel & Frantzeskaki, 2015; Kingsley *et al.*, 2020). No entanto, o manejo inadequado da arborização em locais urbanos também de maneira que deixe a vegetação densa, causa insegurança social (Ivory *et al.*, 2015).

A arborização em praças também pode interferir em espaços recreativos, como estacionamento de automóveis e calçadas ao redor, pois deve-se considerar, além da estética, espécies que são devidamente adequadas e adaptáveis ao ambiente, a fim de diminuir custos de manutenção e para permitir o crescimento adequado das árvores (Russo & Escobedo, 2022). Dessa forma, é necessária uma manutenção regular das espécies inseridas em um espaço urbano, para evitar problemáticas futuras, como pragas e doenças a essas espécies (Liu *et al.*, 2023).

Tabela 1 - Principais desafios no planejamento e manejo de praças urbanas

Categoria	Problemática	Consequências	Ref.
Planejamento e gestão	Arborização inadequada e falta de manutenção	Acidentes, queda de árvores e prejuízos econômicos	A
Manejo ecológico	Redução de polinizadores e manejo incorreto	Perda de biodiversidade e aumento de pragas	B
Vulnerabilidade social	Uso indevido (moradia, álcool, lixo)	Insegurança e baixa atratividade	C
Conforto e segurança	Falta de sombreamento ou vegetação densa	Desconforto térmico e sensação de insegurança	D
Infraestrutura urbana	Escolha inadequada de espécies	Danos urbanos e altos custos de manutenção	E

Nota: A: Wang (2022); Charkraborty *et al.* (2022). B: Aronson *et al.* (2017); Vanbergen *et al.* (2013); Cameron & Sadd (2020). C: Lo & Jim (2010); Torres *et al.* (2013); Hong *et al.* (2018); Plane & Klodawsky (2013); He & Zhu (2018); Farahani & Maller (2019); Mak & Jim (2018). D:

Kabisch & Haase (2014); Buchel & Frantzeskaki (2015); Kingsley et al. (2020); Ivory et al. (2015). E: Russo & Escobedo (2022)

Previamente à arborização, deve-se avaliar as características do local, objetivando selecionar ideótipos de plantas que ocasionam o mínimo de malefícios ao espaço público no futuro (Silva *et al.*, 2019). Esta etapa é indispensável para evitar problemas urbanos que podem futuramente ocorrer pelas modificações submetidas com o processo de expansão arquitetônico e social (Sartori *et al.*, 2021). Somado a isso, a inserção de espécies nativas é primordial, tanto para a identidade biológica regional quanto para o sucesso do projeto, já que normalmente estas estão adaptadas ao clima local e a todos os aspectos necessários para o sucesso do plantio, além de garantir a originalidade específica do meio (Rufino *et al.*, 2019).

Em contrapartida, é inevitável que muitas vezes ocorram mudanças antropizadas com meios errôneos por cidadãos ou funcionários públicos, que podem introduzir espécies exóticas com baixa adaptabilidade, mesmo quando a utilização de nativas é recomendada para boa adaptação no local, pois a população dificilmente está conscientizada sobre técnicas de arborização, visto que esse conhecimento é próprio de profissionais capacitados na área (Braga *et al.*, 2021). Espera-se que, se introduzidas, as árvores exóticas não sejam espécies do tipo invasoras, que prejudiquem o local que são inseridas, a fim de não causar danos à praça e a quem a frequenta (Fernandes *et al.*, 2019).

O contexto histórico também pode influenciar a seleção de espécies, na cidade de Belém, por exemplo, a qual é conhecida como “cidade das mangueiras”, é composta por um ordenamento considerável de *Mangifera indica* L., considerada patrimônio histórico (Silva, 2015). A espécie é exótica, originária da Ásia, e foi inserida no ambiente urbano, com o objetivo de enriquecer o espaço arquitetônico de ruas e praças, sendo ornamental e com ampla floração, além de ajudar no microclima, aumentando a cobertura arbórea na cidade, proporcionando maior área de sombra e diminuindo a sensação de mormaço (Neto, 2013).

No entanto, a predominância de espécies exóticas em ambientes urbanos pode afetar a dinâmica ecológica de espécies nativas e comprometer o equilíbrio de ecossistemas locais. Desta forma, é necessário o planejamento técnico realizado por especialistas, para não suceder detrimientos econômicos e impactos no meio natural (Soares *et al.*, 2021). Assim, a identificação quali-quantitativa é fundamental para a tomada de decisões na implantação de espécies arbóreas em áreas urbanas (Aoki *et al.*, 2020).

3. AVALIAÇÃO FLORÍSTICA COMO FERRAMENTA PARA TOMADAS DE DECISÃO NO MEIO URBANO

A realização de estudos sobre avaliação florística é essencial para auxiliar a gestão pública, a fim de assegurar qualidade e diversidade de espécies plantadas de maneira adequada (Chaves et al., 2019). A arborização é necessária para ajudar no desenvolvimento das cidades, pois causa conforto térmico, ajuda no microclima e assegura a proteção e manutenção do solo, que beneficia projetos da engenharia urbana (Carceneri *et al.*, 2016).

Em Belém, a arborização urbana e pública foi uma das primeiras implantadas no país, contudo, no decorrer do processo de expansão urbana da cidade, foi observado que espaços periféricos foram postergados pela integração florística, enquanto centros urbanos receberam uma organização e arborização mais planejada, diferente de áreas marginalizadas, nas quais tinham uma vegetação mais destoante e com baixa uniformidade (Porto; Silva, 2013). Nesse sentido, a avaliação florística é necessária para subsidiar a tomada de decisões no planejamento urbano, permitindo identificar a composição vegetal existente, condições de manejo e as espécies mais adequadas para cada espaço, com o propósito de gerar um benefício igualitário para a população (Bacelar *et al.*, 2020). Por conseguinte, para se obter resultados para auxiliar gestões públicas e promover uma distribuição mais equitativa dos benefícios proporcionados pela arborização urbana, é necessária a realização da avaliação florística (Soares & Pellizzaro, 2019).

4. COMPOSIÇÃO FLORÍSTICA E USO DE ESPÉCIES NA ARBORIZAÇÃO DE PRAÇAS EM BELÉM

A biodiversidade local e culturalmente rica regionalmente é indispensável, sendo a manutenção de espaços verdes, como praças, está atrelada ao seu desenvolvimento econômico (Sartori *et al.*, 2021). Outrossim, as espécies mais utilizadas em arborização na Amazônia são exóticas e advindas de território asiático, como a mangueira (*M. indica*), figueira (*Ficus Benjamina*) e o jameiro (*Syzygium malaccense*), sendo encontrada entre as mais utilizadas apenas uma nativa, o oiti (*Moquilea Tomentosa*), pertencente ao bioma Mata Atlântica (Soares *et al.*, 2021).

A conservação de biodiversidade em centros urbanos é indispensável para o bem-estar humano, sendo importante conhecer a fauna e as diversas funções ecológicas e paisagísticas que cada espécie proporciona na composição de uma praça (Silva *et al.*, 2019). Outrossim,

contribuir para a conscientização da população em acolher culturalmente a simbologia da composição florística local, considerando que espécies originárias da região favorecerem a conservação do meio natural a qual uma comunidade habita e necessita de equilíbrio ecológico (Rufino *et al.*, 2019).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente revisão narrativa evidenciou que a arborização de praças desempenha papel fundamental na promoção da qualidade ambiental e do bem-estar da população em áreas urbanas. Os estudos analisados demonstraram que esses espaços contribuem para a regulação microclimática, conservação da biodiversidade e oferta de serviços ecossistêmicos relevantes para a sustentabilidade das cidades. Além disso, verificou-se que o planejamento adequado da arborização, associado à seleção criteriosa de espécies e à realização de avaliações florísticas, é essencial para potencializar os benefícios ambientais e sociais desses ambientes. No contexto de Belém, a valorização de espécies adaptadas às condições locais e o fortalecimento das estratégias de gestão das áreas verdes urbanas podem contribuir para a construção de uma cidade mais resiliente frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela expansão urbana.

REFERÊNCIAS

- AOKI, C.; OLIVEIRA, K. R.; FIGUEIREDO, P. A. O.; SÁ, J. dos S. S.; OLIVEIRA, K. M.; CHAVES, J. R. Análise da arborização das praças de Aquidauana (MS, Brasil). **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 12, p. 100737–100750, 2020.
- ARONSON, M. F. J.; LEPCZYK, C. A.; EVANS, K. L.; GODDARD, M. A.; LERMAN, S.B.; MACLVOR, J. S.; NILON, C. H.; VARGO, T. Biodiversity in the city: key challenges for urban green space management. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 15, p. 189–196, 2017.
- BACELAR, W. J. L.; PARRY, M. M.; HERRERA, R. C.; FRANÇA, I. F.; PARRY, S. M. Diagnóstico qualitativo da arborização urbana da cidade de Monte Alegre, Pará, Brasil. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 30, n. 4, p. 1019-1031, 2020.
- BRAGA, P. G. .; CARDOSO, M. M. Os desafios para a conservação da arborização urbana na cidade de Belém-PA. **Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente**, v. 2, n. 3, p. 91, 2021.

- BUCHER, S.; FRANTZESKAKI, N. Citizens' voice: A case study about perceived ecosystem services by urban park users in Rotterdam, the Netherlands. **Ecosystem Services**, v. 12, p. 169-177, 2015.
- CAMERON, S. A.; SADD, B. M. Global Trends in Bumble Bee Health. **Annual Review of Entomology**, v. 65, 2020.
- CARCERERI, V. H.; BIONDI, D.; BATISTA, A. C. Análise da cobertura arbórea das praças de Curitiba-PR. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 11, n. 2, p. 12-26, 2016.
- CHAVES, B. E.; DANTAS, A. G. B.; LIMA, N. S.; PANTOJA, L. D. M.; MENDES, R. M. S. Avaliação qualiquantitativa da arborização da sede dos municípios de Beberibe e Cascavel, Ceará, Brasil. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 1, p. 403-416, 2019.
- ECKER, V. O conceito de praça e a qualidade da paisagem urbana. **Revista Projetar**, Natal, Brasil, v. 5, n.1, 101-110, 2020.
- DAS, S.; CHOUDHURY, M.; CHATTERJEE, B.; DAS, P.; BAGRI, S.; PAUL, D.; BERA, M.; DUTTA, S. Unraveling the urban climate crisis: exploring the nexus of urbanization, climate change, and their impacts on the environment and human well-being – a global perspective. **AIMS Public Health**, v. 11, p. 963–1001, 2024.
- EDSON-CHAVES, B.; DANTAS, A. G. B.; LIMA, N. S.; PANTOJA, L. D. M.; MENDES, R. M. S. Avaliação qualiquantitativa da arborização da sede dos municípios de Beberibe e Cascavel, Ceará, Brasil. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 1, p. 403-416, 2019.
- FARAHANI, L. M.; MALLER, C. Investigating the benefits of 'leftover' places: Residents' use and perceptions of an informal greenspace in Melbourne. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 41, p. 292-302, 2019.
- FERNANDES, C. J.; FERRAZ, M. V.; GIMENES, R.; PEREIRA, S. T. S.; PIVETTA, K. F. L. Trees description in the main square of São José do Rio Preto, São Paulo State, Brazil. **Ornamental Horticulture**, Viçosa, v. 24, n. 4, p.334-340, 2018.
- HE, B.; ZHU, J. Constructing community gardens? Residents' attitude and behaviour towards edible landscapes in emerging urban communities of China. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 34, p. 154-165, 2018.
- HONG, A.; SALLIS, J. F.; KING, A. C.; CONWAY, T. L.; SAELENS, B.; CAIN, K. L.; FOX, E. H.; FRANK, L. D. Linking green space to neighborhood social capital in older adults: The role of perceived safety. **Soc Sci Med**, v. 207, p. 38-45, 2018.
- HUANG, A.; XU, X.; JIA, G. Urbanization pressures on climate adaptation capacity of forest habitats. **Global Change Biology**, v. 31, 2025.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/43166-censo-2022-dois-em-cada-tres-brasileiros-moram-em-vias-sem-rampa-para-cadeirantes>. Acesso em: 20 de maio de 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Balanço: chuvas em Belém foram abaixo da média em novembro**. 2024. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/balan%C3%A7o-chuvas-em-bel%C3%A9m-foram-abaixo-da-m%C3%A9dia-em-novembro>. Acesso em: 27 de maio de 2026.

IVORY, V. C.; RUSSEL, M.; WITTEN, K.; HOOPER, C. M.; PEARCE, J.; BLAKELY, T. What shape is your neighbourhood? Investigating the micro geographies of physical activity. **Social Science & Medicine**, v. 133,, p. 313, 2025.

KABISCH, N.; HAASE, D. Green justice or just green? Provision of urban green spaces in Berlin, Germany. **Landscape and Urban Planning**, v. 122, p. 129-139, 2014.

KINGSLEY, J.; FOENANDER, E.; BAILEY, A. “It’s About Community”: Exploring Social Capital in community gardens across Melbourne, Australia. **Urban Forestry & Urban Greenin**, v. 49, 2020.

MACIEL T. T; BARBOSA, B. C. Áreas verdes urbanas: história, conceitos e importância ecológica. **CES Revista**, v. 29, n. 1, p. 30-42, 2015.

MONTEIRO, F.; GONÇALVES, W.; ANDRADE, L.; VILLAVICENCIO, L.; SILVA, C. Assessment of urban heat islands in Brazil based on MODIS remote sensing data. **Urban Climate**, v. 35, p. 100726, 2020.

MORGENROTH, J.; ÖSTBERG, J. KONIJNENDIJK VAN DEN BOSCH, C.; NIELSEN, A.B; HAUER, R.; SJOMAN, H.; CHEN, W.Y; JANSSEN, M. Urban tree diversity - taking stock and looking ahead. **Urban Forestry and Urban Greening**, Amsterdam, v. 15, p. 1-5, 2016.

MAK, B. K.; JIM, C. Y. Examining fear-evoking factors in urban parks in Hong Kong. **Landscape and Urban Planning**, v. 171, p. 42-56, 2018.

NETO, A.; SOUSA, K.; BORGES, L. Inventário e análise da arborização de praças no município de Campo Belo, MG. **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes**, 2024.

NETO, O. G. **Arborização de Belém: diálogos entre tempos**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

NOAA – NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION. **Global climate report – annual 2025**. Asheville, 2025. Disponível em: <https://www.ncei.noaa.gov/news/global-climate-202513>. Acesso em: 27 de maio de 2026.

- OLIVEIRA, Â.; SANCHES, L.; MUSIS, C.; NOGUEIRA, M. Benefícios da arborização em praças urbanas: o caso de Cuiabá/MT. **Revista Monografias Ambientais**, p. 1900–1915, 2013.
- PANDEY, B.; GHOSH, A. Urban ecosystem services and climate change: a dynamic interplay. **Frontiers in Sustainable Cities**, 2023.
- PIPPI, L. G. A.; LAUTERT, A. R. Praças como espaços públicos relevantes: aspectos pertinentes ao projeto. **Revista Projetar**, v. 4, n. 1, 2019.
- PLANE, J.; KLODAWSKY, F. Neighborhood amenities and health: Examining the importance of a local park. **Social Science & Medicine**. v. 99, p. 1–8, 2013.
- PORTO, L. P. M.; SILVA, H. M. **Manual de orientação técnica da arborização urbana de Belém: guia para planejamento, implantação e manutenção da arborização em logradouros públicos**. Belém: Universidade Federal Rural da Amazônia, 2013.
- LIU, W.; LIU, Y.; WU, S.; LIU, F.; WEN, Y.; WANG, L.; LIU, Q.; HAN, L.; LIU, J.; XU, Y.; REN, C.; HAN, X. Dynamics of plant nutrient requirements and acquisition strategies after afforestation: A study on the Loess Plateau, China. **Forest Ecology and Management**, v. 544, 2023.
- LO, AY.; JIM, CY. Differential community effects on the perception and use of urban green spaces. **Cities**, v. 10, p. 430–442, 2010.
- RIBEIRO, A.; BOLLMANN, H.; OLIVEIRA, A.; RAKAUSKAS, F.; CORTESE, T.; RODRIGUES, M.; QUARESMA, C.; FERREIRA, M. The role of tree landscape to reduce effects of urban heat islands: a study in two Brazilian cities. **Trees**, v. 37, p. 17–30, 2023.
- RUFINO, M. R.; SILVINO, A. S.; MORO, M. F. Exóticas, exóticas, exóticas: reflexões sobre a monótona arborização de uma cidade brasileira. **Rodriguésia**, Rio de Janeiro, v. 70, 2019.
- RUSSO, A.; ESCOBEDO, F. J. From Smart Urban Forests to Edible Cities: New Approaches in Urban Planning and Design. **Urban Planning**, v. 7, p. 131–134, 2022.
- SARTORI, R.A.; BRAGA, J.J.; ANDRADE, S.F.; MATA, S. Urban forestry in the south area of Rio de Janeiro: the society, the species and the damage to urban infrastructure. **Rodriguésia**, Rio de Janeiro, v. 72, 2021.
- SHACKLETON, S.; CHINYINBA, A.; HEBINCK, P.; SHACKLETON, C.; KAOMA, H. Multiple benefits and values of trees in urban landscapes in two towns in northern South Africa. **Landscape and Urban Planning**, v. 136, p. 76–86, 2015.
- SILVA, I.; ALMEIDA, C.; PIMENTEL, D.; LEITE, M.; LANA, M.; BRANDÃO, C.; ALENCAR PAES, R.; VASCONCELOS FREITAS PINTO, A. Percepção sobre a arborização da Praça Centenário em Maceió, AL. **Brazilian Journal of Development**, 2020.

- SILVA, D. A. **Avaliação quali-quantitativa da mangueira (*Mangifera indica* L.) na arborização viária e percepção dos moradores da cidade de Belém-PA.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- SILVA, O.H.; LOCASTRO, J.K.; SANCHES, S.P.; ANGELIS NETO, G.; ANGELIS, B.L.D.; CAXAMBU, M.G. Avaliação da arborização viária da cidade de São Tomé, Paraná. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n.1, p.371-384, 2019.
- SOARES, C. S. S.; SANTOS, O.R.; SOARES, N. R.; CANTUARIA, P. C; LIMA, B.; SILVA, B. M. S. Paradox of afforestation in cities in the Brazilian Amazon: An understanding of the composition and floristic similarity of these urban green spaces. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 66, 2021.
- SOARES, J.; PELLIZZARO, L. Inventário da Arborização Urbana do município de Ampére (Paraná–Brasil). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 5, n. 1, 2019.
- SOUSA, M.; RABBANI, A.; CREPALDI, M.; SILVA, A. Arborização viária e sua relação com a infraestrutura urbana em Almenara, MG, Brasil. **Terra Plural**, v. 14, 2020.
- TORRES, AC.; PRÉVOT, AC.; NADOR, S. Small but mighty: the importance of French community gardens for residents. **Landscape and Urban Plan**, p. 5–14, 2018.
- VANBERGEN, A. J.; BIESMEIJER, J. C.; BRITTON, N. F.; BROWN, M. Threats to an ecosystem service: pressures on pollinators. **Frontiers in Ecology and the Environment**, 2013.
- WANG, J.; ZHOU, W.; JIAO, M. Location matters: planting urban trees in the right places improves cooling. **Front. Ecol. Environ**, v.20, p. 147–151, 2022.
- ZAMPRONI, K.; BIONDI, D.; BOBROWSKI, D. Avaliação quali-quantitativa da espécie *Licania tomentosa* (benth.) fritsch. na arborização viária de bonito-MS. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Curitiba, PR, v.14, n.1, p. 42-52, 2019.

CAPÍTULO XII

GESTÃO DE RESÍDUOS E CONSCIÊNCIA COLETIVA: O CASO DE CORONEL JOÃO PESSOA/RN

WASTE MANAGEMENT AND COLLECTIVE AWARENESS: THE CASE OF CORONEL JOÃO PESSOA/RN

DOI: 10.51859/ampla.mac6200-12

Maria Isabelli de Queiroz Aquino¹

Ketely Naama da Silva Pires²

Maria José de Holanda Leite³

Andréa de Vasconcelos Freitas Pinto⁴

Amanda Alves Feitosa⁵

¹ Curso Técnico de Apicultura. Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN) – Campus Pau dos Ferros. RN, Brasil.

² Curso Técnico de Apicultura. Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN) – Campus Pau dos Ferros. RN, Brasil

³ Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus de Engenharias e Ciências Agrárias (CECA), Brasil.

⁴ Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus de Engenharias e Ciências Agrárias (CECA), Brasil.

⁵ Universidade do estado do Rio de Janeiro (UERJ)

RESUMO

Este trabalho analisou a gestão de resíduos sólidos no município de Coronel João Pessoa/RN, confrontando a realidade local com os dispositivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). O estudo, de natureza diagnóstico-participativa, investiga o papel da sociedade civil e o nível de conhecimento da comunidade escolar acerca da destinação final de resíduos e dos impactos socioambientais do lixo local. A pesquisa foi estruturada a partir de levantamentos históricos, inspeções *in loco* e aplicação de questionários junto a 40 discentes do Ensino Fundamental II e Médio em novembro de 2025. Os resultados revelam um paradoxo: embora a temática ambiental seja reconhecida como relevante pelos jovens, há uma lacuna significativa de informações estratégicas sobre o sistema de gestão municipal, o que contribui para a invisibilidade da problemática e perpetua o descarte inadequado. A análise evidencia que a escassez de dados divulgados e a ausência de políticas de educação ambiental continuadas são os principais obstáculos para a efetivação da responsabilidade compartilhada preconizada pela Lei nº 12.305/2010. O estudo conclui que a superação desse cenário não depende apenas de infraestrutura, mas da democratização da informação e do engajamento comunitário. Propõe-se, portanto, a implementação de ações diagnósticas contínuas, rodas de conversa e a

valorização de agentes de reciclagem como protagonistas de uma economia circular. A conscientização coletiva, fundamentada na compreensão do ciclo de vida dos produtos, surge como o caminho essencial para a construção de um ambiente mais resiliente, harmônico e sustentável, mitigando os riscos à saúde pública e protegendo os ecossistemas locais.

Palavras-chave: Educação ambiental. Sustentabilidade. Meio Ambiente.

ABSTRACT

This study analyzed solid waste management in the municipality of Coronel João Pessoa, Rio Grande do Norte, Brazil, comparing the local reality with the provisions established by the National Solid Waste Policy (NSWP). The research adopted a diagnostic-participatory approach, investigating the role of civil society and the level of knowledge among the school community regarding waste disposal practices and the socio-environmental impacts associated with the local open dump. The study was based on historical surveys, field inspections, and the application of questionnaires to 40 elementary and high school students in November 2025. The results revealed a paradox: although environmental issues are recognized as important by young people, there is a significant lack of strategic information about the municipal waste management system,

which contributes to the invisibility of the problem and perpetuates inadequate waste disposal practices. The analysis showed that the scarcity of publicly available information and the absence of continuous environmental education policies are the main barriers to the effective implementation of the shared responsibility principle established by Law No. 12,305/2010. The study concludes that overcoming this scenario depends not only on infrastructure improvements but also on the democratization of information and active community engagement. Therefore, it proposes the

implementation of continuous diagnostic actions, discussion groups, and the recognition of recycling workers as key actors in the circular economy. Collective awareness, grounded in an understanding of product life cycles, emerges as an essential pathway toward building a more resilient, harmonious, and sustainable environment, reducing risks to public health and protecting local ecosystems.

Keywords: Environmental education. Sustainability. Environment.

1. INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos sólidos constitui um dos principais desafios ambientais e administrativos enfrentados pelos municípios brasileiros, especialmente aqueles de pequeno porte, que frequentemente apresentam limitações financeiras, técnicas e estruturais para implementar sistemas eficientes de coleta, tratamento e disposição final dos resíduos. Nesse contexto, a adequada gestão dos resíduos é fundamental para a promoção da saúde pública, da qualidade ambiental e do desenvolvimento sustentável (JACOBI; BESEN, 2011).

No município de Coronel João Pessoa/RN, a realidade do descarte de resíduos demanda uma análise crítica pautada nos princípios estabelecidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010. Essa legislação representa um importante marco regulatório ao estabelecer diretrizes para a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos em todo o território nacional (BRASIL, 2010).

A PNRS introduz uma hierarquia de ações voltadas à gestão dos resíduos, priorizando a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento e, por último, a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Além disso, a legislação fortalece o conceito de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, atribuindo deveres aos fabricantes, distribuidores, comerciantes, consumidores e ao poder público (BRASIL, 2010; DEMAJOROVIC et al., 2014).

Nesse cenário, a conscientização ambiental da população assume papel estratégico para a efetividade das políticas públicas voltadas ao manejo dos resíduos. A educação ambiental contribui para a mudança de hábitos e para o fortalecimento da participação social, promovendo práticas mais sustentáveis de consumo e descarte. Segundo Jacobi (2003), a

participação cidadã e a construção de uma consciência ambiental coletiva são elementos essenciais para enfrentar os desafios socioambientais contemporâneos.

Adicionalmente, a valorização dos catadores de materiais recicláveis constitui um aspecto fundamental para a consolidação da economia circular e da inclusão social. Esses trabalhadores desempenham papel relevante na recuperação de materiais recicláveis, contribuindo para a redução dos impactos ambientais e para a geração de renda. A própria PNRS reconhece a importância da integração dos catadores nas ações de coleta seletiva e reciclagem, reforçando sua contribuição para a sustentabilidade e para o desenvolvimento local (BRASIL, 2010; IPEA, 2013).

O estudo teve como objetivo compreender o nível de conhecimento da população acerca da problemática dos resíduos sólidos urbanos e do histórico de utilização do lixo municipal, bem como estimular reflexões sobre a importância da gestão ambiental sustentável e da participação social na conservação do meio ambiente.

2. METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida em duas instituições públicas de ensino localizadas no município de Coronel João Pessoa, Rio Grande do Norte. A primeira etapa ocorreu na Escola Municipal Adília Tertulina de Freitas, situada na comunidade de Vila Caldeirão, que atende estudantes do Ensino Fundamental e desempenha importante papel na formação educacional das comunidades rurais do município. A segunda etapa foi realizada na Escola Estadual Professor José Próspero, localizada na zona urbana de Coronel João Pessoa, instituição responsável pela oferta do Ensino Médio e que atende estudantes provenientes tanto da sede municipal quanto de comunidades circunvizinhas. A escolha dessas instituições teve como finalidade contemplar diferentes níveis de escolarização e possibilitar uma análise comparativa da percepção ambiental entre estudantes de distintas faixas etárias e contextos educacionais.

Inicialmente, foi realizado um levantamento bibliográfico e documental sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, além da consulta a documentos oficiais do município e fontes secundárias relacionadas à gestão de resíduos sólidos. Essa etapa permitiu a contextualização histórica e socioambiental da área de estudo, subsidiando a elaboração dos instrumentos de coleta de dados.

A coleta de dados ocorreu por meio da aplicação de questionários semiestruturados junto a estudantes do Ensino Fundamental II e do Ensino Médio, buscando avaliar o conhecimento dos participantes sobre resíduos sólidos, descarte adequado, impactos ambientais e a realidade do lixão de Coronel João Pessoa/RN. Na primeira etapa da pesquisa, realizada em 04 de novembro de 2025, participaram 25 estudantes do 6º ao 9º ano da Escola Municipal Adília Tertulina de Freitas, localizada na Vila Caldeirão (Figura 1), sendo 10 do sexo feminino e 15 do sexo masculino. Na segunda etapa, realizada em 10 de novembro de 2025, participaram 15 estudantes do 3º ano do Ensino Médio da Escola Estadual Professor José Próspero (Figura 2), situada na zona urbana do município.

Figura 1. Aplicação dos questionários e apresentação do projeto aos estudantes da Escola Municipal Adília Tertulina de Freitas, Vila Caldeirão, Coronel João Pessoa/RN.



Fonte: Autores (2025)

Figura 2. Aplicação dos questionários aos estudantes do 3º ano do Ensino Médio da Escola Estadual Professor José Próspero, Coronel João Pessoa/RN.



Fonte: Autores (2025)

Complementarmente, foram conduzidas visitas de campo ao lixão municipal para observação direta das condições ambientais e das práticas de descarte de resíduos. Durante as visitas, foram realizados registros fotográficos e anotações de campo, possibilitando a documentação da área estudada e a análise visual dos impactos ambientais observados. Também foram realizadas conversas informais com moradores e trabalhadores vinculados às atividades de coleta de materiais recicláveis, contribuindo para uma compreensão mais ampla da percepção social acerca da problemática investigada.

Os dados obtidos foram organizados e analisados por meio de estatística descritiva simples, utilizando frequências absolutas e relativas para as questões objetivas. As informações qualitativas provenientes das observações de campo e dos relatos dos participantes foram interpretadas de forma descritiva, permitindo identificar percepções, lacunas de conhecimento e potenciais estratégias de sensibilização ambiental.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Embora tenha sido observado elevado interesse dos estudantes em participar da pesquisa, os resultados evidenciaram limitações no conhecimento sobre a gestão dos resíduos sólidos no município, bem como sobre os impactos ambientais e sociais decorrentes do descarte inadequado do lixo. Muitos participantes demonstraram desconhecimento acerca do destino final dos resíduos produzidos em suas residências, indicando uma desconexão entre os hábitos cotidianos de consumo e descarte e as consequências ambientais geradas.

Esse resultado é semelhante ao encontrado por Jacobi (2003), que destaca que a falta de informação e de sensibilização ambiental ainda constitui um dos principais obstáculos para a participação efetiva da sociedade na solução dos problemas ambientais. Da mesma forma, Silva (2024), ao analisar a gestão de resíduos sólidos no Rio Grande do Norte, verificou que municípios de pequeno porte apresentam desafios relacionados à educação ambiental, à infraestrutura de coleta e à implementação de políticas públicas voltadas ao gerenciamento adequado dos resíduos.

Durante as visitas técnicas ao lixão municipal, foram registradas condições que demonstram a persistência de práticas inadequadas de disposição final dos resíduos sólidos urbanos. A Figura 3 apresenta uma visão panorâmica da área estudada, evidenciando a deposição dos resíduos diretamente sobre o solo e a presença de focos de queima de materiais descartados. A emissão de fumaça observada durante a visita indica a ocorrência de

combustão de resíduos, prática que contribui para a liberação de gases poluentes e pode causar impactos negativos à qualidade do ar e à saúde da população.

Figura 3. Vista panorâmica do lixão municipal de Coronel João Pessoa/RN, evidenciando a disposição de resíduos sólidos a céu aberto e focos de queima observados durante a visita técnica.



Fonte: Autores (2025).

Além da disposição inadequada dos resíduos, observou-se a proximidade entre a área de descarte e remanescentes da vegetação nativa da Caatinga, aumentando o risco de degradação ambiental e comprometimento dos ecossistemas locais. Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), os resíduos devem receber destinação ambientalmente adequada, sendo os lixões considerados formas inadequadas de disposição final devido aos impactos ambientais e sociais associados à sua manutenção.

A Figura 4 evidencia a presença de resíduos dispersos em áreas adjacentes ao lixão, incluindo plásticos, embalagens e materiais diversos depositados próximos à vegetação e às vias de acesso. Esse cenário demonstra que os impactos da disposição inadequada dos resíduos ultrapassam os limites da área principal de descarte, ampliando os riscos de contaminação ambiental e favorecendo a proliferação de vetores associados a doenças. Estudos do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2013) destacam que áreas de disposição irregular de resíduos frequentemente apresentam problemas relacionados à saúde pública, à poluição visual e à degradação da qualidade ambiental.

Figura 4. Resíduos sólidos dispersos em áreas adjacentes ao lixão municipal e registro da visita de campo realizada para documentação das condições ambientais da área.



Fonte: Autores (2025).

É importante destacar que as observações realizadas durante a visita técnica ao lixão de Coronel João Pessoa/RN permitiram identificar diversas inadequações relacionadas ao manejo e à disposição final dos resíduos sólidos. Os aspectos observados evidenciam a ausência de práticas compatíveis com os princípios da gestão ambientalmente adequada dos resíduos, previstos na legislação brasileira, especialmente na Política Nacional de Resíduos Sólidos. As evidências registradas em campo demonstram potenciais riscos ao meio ambiente, à saúde pública e aos ecossistemas locais, reforçando a necessidade de medidas corretivas e de estratégias voltadas à mitigação dos impactos identificados.

A Tabela 1 sintetiza os principais aspectos observados durante a atividade de campo, relacionando as evidências encontradas e seus possíveis impactos ambientais. Os dados apresentados evidenciam um cenário de significativa vulnerabilidade ambiental associado à disposição inadequada dos resíduos sólidos. A deposição direta dos resíduos sobre o solo, sem qualquer tipo de impermeabilização ou sistema de contenção, favorece a infiltração do chorume, líquido resultante da decomposição da matéria orgânica. Esse efluente apresenta elevada carga poluidora e pode contaminar o solo e os recursos hídricos subterrâneos,

comprometendo a qualidade ambiental da área e representando riscos à saúde das populações que dependem dessas fontes de água.

Outro aspecto relevante observado foi a ocorrência da queima de resíduos, evidenciada pela presença de fumaça e focos de combustão. Essa prática, frequentemente registrada em lixões a céu aberto, contribui para a emissão de gases de efeito estufa e de compostos tóxicos, como material particulado, monóxido de carbono e substâncias potencialmente carcinogênicas. Além dos prejuízos à qualidade do ar, a queima pode provocar problemas respiratórios nas comunidades próximas e ampliar os riscos de incêndios descontrolados.

A dispersão de resíduos plásticos pela área também se mostrou um problema significativo. Sacolas, embalagens e outros materiais leves são facilmente transportados pela ação dos ventos, ampliando a área afetada pela poluição. Além do impacto estético e da degradação da paisagem, esses resíduos podem causar danos à fauna local, seja por ingestão acidental, emaranhamento ou alteração dos habitats naturais.

A proximidade entre a área de disposição dos resíduos e remanescentes de vegetação nativa da Caatinga representa outro fator preocupante. A introdução de contaminantes no ambiente pode afetar a flora e a fauna características desse bioma, considerado exclusivamente brasileiro e reconhecido por sua importância ecológica. A degradação desses ambientes pode resultar na perda de biodiversidade, na redução dos serviços ecossistêmicos e no comprometimento da resiliência ambiental da região semiárida.

Por fim, a ausência de infraestrutura adequada constitui um dos principais agravantes observados. A inexistência de sistemas de impermeabilização do solo, drenagem de chorume, captação de gases e controle operacional demonstra que o local não atende aos requisitos mínimos para a disposição ambientalmente adequada dos resíduos. Essa deficiência potencializa todos os impactos identificados, favorecendo a contaminação ambiental, a proliferação de vetores de doenças e a exposição da população a condições insalubres.

De modo geral, os resultados evidenciam que o lixão de Coronel João Pessoa/RN apresenta características típicas de áreas de disposição irregular de resíduos sólidos, configurando uma fonte permanente de degradação ambiental e de riscos à saúde pública. Esses achados reforçam a necessidade de implementação de medidas de recuperação ambiental, encerramento adequado da área e adoção de sistemas de gerenciamento de resíduos compatíveis com os princípios da sustentabilidade e da legislação vigente.

Tabela 1. Principais aspectos observados durante a visita ao lixão de Coronel João Pessoa/RN.

Aspecto observado	Evidência encontrada	Possíveis impactos ambientais
Disposição inadequada dos resíduos	Resíduos depositados diretamente sobre o solo	Contaminação do solo e das águas subterrâneas
Queima de resíduos	Presença de fumaça e focos de combustão	Emissão de gases tóxicos e poluição atmosférica
Dispersão de resíduos plásticos	Sacolas e embalagens espalhadas pela área	Poluição visual e riscos à fauna
Proximidade com vegetação nativa	Resíduos localizados próximos à Caatinga	Degradação dos ecossistemas locais
Ausência de infraestrutura adequada	Inexistência de sistemas de tratamento e impermeabilização	Aumento dos impactos ambientais e sanitários

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Os resultados obtidos reforçam a importância da educação ambiental como ferramenta para promover mudanças de comportamento e ampliar o conhecimento da população sobre os problemas ambientais locais. Durante a realização das atividades, observou-se que a apresentação das informações e a discussão sobre a realidade do lixão despertaram interesse e reflexão entre os estudantes, demonstrando o potencial das ações educativas para estimular atitudes mais sustentáveis.

Nesse contexto, a escola assume papel fundamental na formação de cidadãos ambientalmente conscientes, capazes de compreender os impactos de suas ações e participar ativamente da construção de soluções para os problemas ambientais do município. A Política Nacional de Educação Ambiental (Lei nº 9.795/1999) reconhece a educação como um instrumento essencial para o desenvolvimento de valores, conhecimentos e competências voltados à conservação do meio ambiente.

Portanto, os resultados desta pesquisa evidenciam a necessidade de fortalecer ações permanentes de educação ambiental, ampliar a divulgação de informações sobre a gestão dos resíduos sólidos e incentivar a participação comunitária nas discussões relacionadas à sustentabilidade. Além disso, recomenda-se o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à coleta seletiva, à reciclagem e à destinação ambientalmente adequada dos resíduos, contribuindo para a redução dos impactos observados e para a melhoria da qualidade ambiental do município de Coronel João Pessoa/RN.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento desta pesquisa possibilitou compreender a relevância da gestão adequada dos resíduos sólidos para a promoção da qualidade ambiental e da saúde pública no município de Coronel João Pessoa/RN. A análise realizada evidenciou que, apesar da crescente discussão sobre sustentabilidade e preservação ambiental, ainda existem lacunas significativas no conhecimento da população, especialmente entre os estudantes, acerca da destinação dos resíduos e dos impactos associados ao descarte inadequado.

As observações de campo realizadas no lixão municipal demonstraram a persistência de problemas ambientais decorrentes da disposição inadequada dos resíduos sólidos, incluindo a presença de materiais descartados diretamente sobre o solo, focos de queima e resíduos dispersos em áreas adjacentes. Tais condições reforçam a necessidade de adoção de medidas alinhadas aos princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos, visando reduzir os impactos ambientais e promover formas mais sustentáveis de gerenciamento dos resíduos urbanos.

Além de contribuir para o levantamento de informações sobre uma temática ainda pouco explorada no município, a pesquisa desempenhou importante papel educativo ao estimular a reflexão crítica dos participantes sobre a realidade ambiental local. O envolvimento dos estudantes durante a aplicação dos questionários demonstrou que a educação ambiental pode atuar como uma ferramenta transformadora, favorecendo a construção de valores, atitudes e práticas voltadas à sustentabilidade.

Diante dos resultados obtidos, recomenda-se o fortalecimento de ações permanentes de educação ambiental nas escolas, a realização de campanhas de conscientização comunitária, o incentivo à coleta seletiva e a ampliação do diálogo entre poder público e sociedade civil sobre a gestão dos resíduos sólidos. Também se destaca a importância de novas pesquisas que aprofundem a compreensão dos impactos socioambientais do lixão e contribuam para a elaboração de estratégias de recuperação ambiental e desenvolvimento sustentável no município.

Por fim, conclui-se que a construção de uma consciência coletiva sobre os resíduos sólidos depende da participação conjunta da população, das instituições de ensino e do poder público. Somente por meio do compromisso compartilhado será possível promover mudanças

efetivas capazes de garantir a conservação ambiental, a melhoria da qualidade de vida da população e a construção de um futuro mais sustentável para Coronel João Pessoa/RN.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999. Institui a Política Nacional de Educação Ambiental. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 1999.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2010.
- DEMAJOROVIC, J.; MIGLIANO, J. E. B.; SOUZA, M. T. S. Logística reversa e responsabilidade compartilhada na Política Nacional de Resíduos Sólidos. *Revista de Administração Mackenzie*, v. 15, n. 2, p. 67–95, 2014.
- IPEA. *Situação social das catadoras e dos catadores de material reciclável e reutilizável*. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2013.
- JACOBI, P. Educação ambiental, cidadania e sustentabilidade. *Cadernos de Pesquisa*, n. 118, p. 189–205, 2003.
- JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. *Estudos Avançados*, v. 25, n. 71, p. 135–158, 2011.
- SILVA, V. E. M. *Gestão de resíduos sólidos no Rio Grande do Norte: revisão teórica, avanços, desafios e perspectivas*. 2024. 34 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024.

CAPÍTULO XIII

EFEITO DO HIDROCONDICIONAMENTO SOBRE A GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE ANADENANTHERA COLUBRINA (VELL.) BRENNAN SUBMETIDAS AO ESTRESSE TÉRMICO

EFFECT OF HYDROPRIMING ON THE GERMINATION OF ANADENANTHERA COLUBRINA (VELL.) BRENNAN SEEDS SUBJECTED TO HEAT STRESS

DOI: 10.51859/amplla.mac6200-13

João Gabriel Barbosa Santos ¹

Monalisa Alves Diniz da Silva ²

Agda Taynná de Amorim ³

Tânia da Silva Siqueira ⁴

¹ Engenheiro Agrônomo- Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE. Unidade Acadêmica de Serra Talhada-UAST.

² Docente da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UFRPE/UAST).

³ Mestranda no Programa de pós graduação em Produção Vegetal. Universidade Federal Rural de Pernambuco- UFRPE. Unidade Acadêmica de Serra Talhada- UAST.

⁴ Doutoranda em Produção Agrícola. Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE)

RESUMO

Anadenanthera colubrina (Vell.) Brenan, conhecida como angico, é uma espécie arbórea nativa de elevada importância ecológica e econômica, amplamente distribuída no território brasileiro. Apesar de sua adaptação às condições do Semiárido, o aumento da temperatura decorrente das mudanças climáticas pode comprometer o desempenho fisiológico de suas sementes durante a germinação. Nesse contexto, o hidrocondicionamento tem sido proposto como uma alternativa para aumentar a tolerância das sementes a condições de estresse térmico. O presente estudo teve como objetivo avaliar a influência de diferentes períodos de hidrocondicionamento sobre a germinação e o vigor de sementes de angico submetidas a temperaturas de 30, 35, 40 e 45 °C. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 × 4, composto por quatro períodos de hidratação (0, 1, 2 e 3 horas) e quatro temperaturas de incubação, com quatro repetições de 25 sementes por tratamento. Foram avaliados o teor de água das sementes, a germinação (protrusão da raiz primária), o índice de velocidade de germinação e o tempo médio de germinação. As

temperaturas de 30 e 35 °C proporcionaram os melhores resultados para a germinação e o vigor das sementes, enquanto temperaturas mais elevadas comprometeram significativamente o desempenho fisiológico. O hidrocondicionamento, por sua vez, não foi eficiente para atenuar os efeitos do estresse térmico. Conclui-se que a germinação de sementes de *Anadenanthera colubrina* é favorecida nas temperaturas de 30 e 35 °C, e que os períodos de hidrocondicionamento empregados neste estudo não conferem maior tolerância ao estresse térmico.

Palavras-chave: Angico. Germinação; Hidrocondicionamento. Qualidade fisiológica. Temperatura.

ABSTRACT

Anadenanthera colubrina (Vell.) Brenan, commonly known as angico, is a native tree species of great ecological and economic importance, widely distributed throughout Brazil. Although well adapted to semiarid environments, increasing temperatures associated with climate change may impair the physiological performance of its seeds during germination. In this context, hydropriming

has been proposed as a strategy to enhance seed tolerance to stress conditions. This study aimed to evaluate the effects of different hydropriming periods on the germination and vigor of *A. colubrina* seeds exposed to temperatures of 30, 35, 40, and 45 °C. The experiment was carried out in a completely randomized design using a 4 × 4 factorial arrangement, consisting of four hydration periods (0, 1, 2, and 3 h) and four incubation temperatures, with four replicates of 25 seeds per treatment. Seed water content, germination percentage, germination speed index, and mean germination time were evaluated. Temperatures of 30 and 35 °C

provided the best germination and vigor performance, whereas higher temperatures markedly reduced seed physiological quality. Hydropriming, however, was not effective in alleviating the effects of heat stress, showing no consistent improvement in the evaluated variables. It was concluded that germination of *A. colubrina* seeds is favored at 30 and 35 °C, while the hydropriming periods adopted in this study did not increase seed tolerance to thermal stress.

Keywords: Angico. Germination. Hydropriming. Physiological quality. Temperature.

1. INTRODUÇÃO

Anadenanthera colubrina (Vell.) Brenan, conhecida popularmente como angico, é uma espécie arbórea da família Fabaceae, com ocorrência natural nos biomas Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica. Apresenta altura entre 7 e 15 metros e possui expressiva importância econômica devido ao aproveitamento da madeira, ao uso medicinal e à sua aplicação em projetos de arborização urbana e paisagismo (Pareyn *et al.*, 2018).

As espécies nativas da Caatinga apresentam adaptações que lhes permitem sobreviver em condições ambientais adversas. Entretanto, a intensificação dos eventos climáticos extremos tem aumentado a exposição dessas espécies a diferentes fatores de estresse, os quais podem comprometer a germinação das sementes e o estabelecimento inicial das plântulas. Dessa forma, compreender os limites de tolerância das sementes torna-se fundamental para o sucesso da regeneração e da produção de mudas (Dantas, 2019).

Entre os fatores ambientais que afetam a germinação, a temperatura destaca-se por exercer influência direta sobre diversos processos fisiológicos, como a embebição, a lixiviação de exsudatos, a atividade enzimática, a mobilização de reservas e o desenvolvimento inicial das plântulas (Marcos Filho, 2015). Nesse cenário, a busca por técnicas capazes de reduzir os efeitos do estresse térmico torna-se uma estratégia importante para preservar a qualidade fisiológica das sementes.

O hidrocondicionamento consiste em uma técnica de ativação metabólica realizada antes da germinação e tem sido empregado com o objetivo de aumentar a tolerância das sementes a condições ambientais desfavoráveis (Medeiros *et al.*, 2021). Assim, neste estudo, sementes de angico foram submetidas ao hidrocondicionamento e, posteriormente, expostas

às temperaturas de 30, 35, 40 e 45 °C, visando avaliar o potencial dessa técnica na atenuação dos efeitos do estresse térmico sobre a germinação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. LOCAL DE REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

O estudo foi conduzido no Laboratório de Sementes da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UAST). Foram utilizadas sementes de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan, coletadas no município de Sertânia -PE em outubro de 2024, fornecidas pelo Núcleo de Ecologia e Monitoramento Ambiental (NEMA).

2.2. MATERIAL VEGETAL

As sementes, oriundas do Programa de Resgate de Germoplasma do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF), foram submetidas previamente a quatro períodos de hidratação (0, 1, 2 e 3 horas). Para a condução dos mesmos, as sementes foram semeadas sobre uma folha de papel de germinação (Germitest) com uma segunda folha sobreposta, com a formação de um rolo, o substrato foi previamente umedecido com volume de água equivalente a 2,5 vezes o seu peso seco. Em seguida, os rolos foram mantidos em sala climatizada, à temperatura de 25 °C, durante os respectivos períodos de hidratação.

Após os períodos de hidrocondicionamento, retirou-se as sementes para determinação do teor de água e para a condução do teste de germinação sob temperaturas constantes de 30, 35, 40 e 45 °C.

2.3. CONDUÇÃO EXPERIMENTAL

Inicialmente, realizou-se a assepsia das sementes por meio da imersão em solução contendo cinco gotas de detergente para cada 100 mL de água, durante 10 minutos, conforme as recomendações das Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2013). Em seguida, procedeu-se aos períodos de hidrocondicionamento antes da instalação do teste de germinação.

O teor de água, após cada período de hidratação, foi determinado pelo método da estufa a 105 ± 3 °C durante 24 horas, conforme as Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2025). Foram utilizadas quatro repetições de 25 sementes para cada período de hidratação, sendo os resultados expressos em porcentagem. Destaca-se que a avaliação da germinação

sob diferentes temperaturas não foi realizada simultaneamente em diferentes câmaras, pela própria indisponibilidade dos equipamentos. Assim antes da submissão a cada temperatura, realizavam-se os diferentes períodos de hidratação, com posterior avaliação do teor de água.

Para cada temperatura avaliou-se diariamente o número de sementes com a protrusão da raiz primária, de modo que fossem obtidos dados sobre a germinação, o índice de velocidade e o tempo médio de germinação.

Germinação (protrusão da raiz primária): o teste foi realizado com quatro repetições de 25 sementes, distribuídas sobre duas folhas de papel mata-borrão previamente umedecidas com volume de água equivalente a 2,5 vezes o peso do papel seco. As sementes foram acondicionadas em caixas plásticas do tipo gerbox e mantidas em câmara de germinação do tipo B.O.D. (Demanda Bioquímica de Oxigênio), sob temperaturas constantes de 30, 35, 40 e 45 °C. As avaliações foram realizadas diariamente, até o décimo dia após a semeadura, conforme as Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2013).

Índice de velocidade de germinação (IVG): o IVG foi calculado conforme a metodologia proposta por Maguire (1962), utilizando-se as contagens diárias das sementes que apresentaram protrusão da raiz primária até o décimo dia após a semeadura, de acordo com a seguinte expressão:

$$IVG = (G_1/N_1) + (G_2/N_2) + \dots + (G_n/N_n)$$

em que $G_1, G_2, \dots, G_n$ correspondem ao número de sementes germinadas em cada contagem e $N_1, N_2, \dots, N_n$ representam o número de dias transcorridos desde a semeadura até cada avaliação.

Tempo médio de germinação (TMG): o TMG foi obtido simultaneamente ao teste de germinação, utilizando as contagens diárias realizadas até o décimo dia após a semeadura. O cálculo foi efetuado conforme a metodologia descrita por Labouriau (1983), empregando a seguinte equação:

$$TMG = [(S_1 \times D_1) + \dots + (S_n \times D_n)] / Stotal$$

em que TMG corresponde ao tempo médio de germinação (dias), S_1-S_n representam o número de sementes germinadas em cada contagem, D_1-D_n correspondem ao número de dias após a semeadura e Stotal representa o total de sementes germinadas em cada repetição.

2.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para a variável teor de água das sementes, adotou-se o delineamento inteiramente casualizado, considerando os diferentes períodos de hidratação como fonte de variação, antes da submissão das sementes à cada temperatura de germinação. As variáveis relacionadas ao processo germinativo foram avaliadas em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4×4 , constituído por quatro períodos de hidratação (0, 1, 2 e 3 horas) e quatro temperaturas de incubação (30, 35, 40 e 45 °C).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando constatado efeito significativo, as médias foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R.

3. RESULTADOS

De maneira geral, observou-se acréscimo no teor de água à medida que o período de hidratação foi ampliado, evidenciando a eficiência do processo de embebição das sementes. Essa avaliação permitiu confirmar que os períodos de hidratação foram conduzidos sob condições adequadas antes da exposição às diferentes temperaturas de germinação.

Com o objetivo de avaliar a influência dos diferentes períodos de hidratação sobre o teor de água das sementes de angico, realizou-se uma análise de variância. Os resultados obtidos, apresentados nas Tabelas 1, 2, 3 e 4, indicaram que não houve diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos.

Tabela 1. Análise de variância do teor de água das sementes de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan, submetidas à diferentes períodos de hidrocondicionamento, antes do teste de germinação à 30 °C. Serra Talhada – PE. 2025.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F calculado	p-valor
Tratamento	3	191,86	63,954	0,86	0,4898
Erro	12	896	74,666		
Total	15	1087,86			
CV (%)	33,55				

GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma de Quadrados; QM: Quadrado Médio; CV: Coeficiente de Variação; Tratamento: Períodos de hidratação (0, 1; 2 e 3h). Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 2. Quadro da análise de variância do teor de água das sementes de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan, submetidas à diferentes períodos de hidratação, antes do teste de germinação à 35 °C. Serra Talhada – PE. 2025.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F calculado	p-valor
Tratamento	3	106,58	35,527	0,73	0,5516
Erro	12	580,93	48,411		
Total	15	687,51			
CV (%)	39,14				

GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma de Quadrados; QM: Quadrado Médio; CV: Coeficiente de Variação; Tratamento: Períodos de hidratação (0, 1; 2 e 3h).

Tabela 3. Quadro da análise de variância do teor de água das sementes *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan, submetidas a diferentes períodos de hidratação, antes do teste de germinação à 40 °C. Serra Talhada – PE. 2025.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F calculado	p-valor
Tratamento	3	24,73	8,244	0,09	0,9656
Erro	12	1131,07	94,256		
Total	15	1155,81			
CV (%)	31,25				

GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma de Quadrados; QM: Quadrado Médio; CV: Coeficiente de Variação; Tratamento: Períodos de hidratação (0, 1; 2 e 3h).

Tabela 4. Quadro da análise de variância do teor de água das sementes de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan, submetidas à diferentes períodos de hidratação, antes do teste de germinação à 45 °C. Serra Talhada – PE. 2025.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F calculado	p-valor
Tratamento	3	792,92	264,305	2,72	0,0911
Erro	12	1166,46	97,205		
Total	15	1959,37			
CV (%)	28,44				

GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma de Quadrados; QM: Quadrado Médio; CV: Coeficiente de Variação; Tratamento: Períodos de hidratação (0, 1; 2 e 3h).

Na Tabela 5 são apresentados os resultados da análise de variância para a germinação das sementes de angico. Verificou-se efeito significativo dos períodos de hidratação ($p =$

0,0047), das temperaturas de incubação ($p < 0,0001$) e da interação entre esses fatores ($p = 0,0036$), indicando que a resposta germinativa das sementes ao hidrocondicionamento depende da temperatura de incubação. Dessa forma, a interpretação dos resultados foi realizada com base na interação entre os fatores.

Tabela 5. Quadro da análise de variância referente a germinação (%) das sementes de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan, submetidas previamente à diferentes períodos de hidratação e posteriormente à quatro temperaturas. Serra Talhada – PE. 2025.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F calculado	p-valor
Fator 1 (F1)	3	1007	4	4,9	0,0047 **
Fator 2 (F2)	3	85197	3	415,09	0,0000 ***
Interação F1*F2	9	2008	2	3,26	0,0036 **
Resíduo	48	3284	5		
Total	63	91496			
CV (%)	13,55				

GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma de Quadrados; QM: Quadrado Médio; CV: Coeficiente de Variação; Fator 1: Períodos de hidratação (0, 1; 2 e 3h); Fator 2: Temperaturas (30, 35, 40 e 45 °C). Fonte: elaborado pelo autor.

Nas temperaturas de 30 e 35 °C (Tabela 6), os diferentes períodos de hidratação não promoveram alterações significativas na germinação em comparação às sementes não hidratadas, indicando que o hidrocondicionamento não influenciou o desempenho germinativo nessas condições. Em contrapartida, na temperatura de 40 °C, a hidratação afetou negativamente a capacidade germinativa, sendo observada redução da germinação nas sementes submetidas à hidratação por 1; 2 e 3 horas, com efeito mais acentuado no período de 3 horas. À 45 °C nenhuma germinação foi verificada quando as sementes foram hidratadas por 2 e 3 horas, na ausência de hidratação ou hidratação por 1h, constatou-se apenas 1% de sementes com a protrusão da raiz primária.

Esse comportamento pode estar relacionado ao aumento do teor de água das sementes promovido pela hidratação, tornando-as mais suscetíveis aos danos térmicos causados pelo aumento das temperaturas de incubação. Temperaturas elevadas favorecem processos de deterioração, como desnaturação de proteínas, desorganização das membranas celulares e peroxidação lipídica, comprometendo a viabilidade das sementes (Krzyzanowski *et al.*, 2022).

Os maiores percentuais de germinação foram observados nas temperaturas de 30 e 35 °C para todos os períodos de hidratação avaliados. Entretanto, a 40 °C, a resposta das sementes variou em função do período de hidratação, evidenciando a interação entre os fatores. Em contraste, o aumento da temperatura para 40 e 45 °C reduziu acentuadamente a germinação, especialmente nas sementes previamente hidratadas, confirmando o efeito prejudicial do estresse térmico sobre o processo germinativo. Esses resultados corroboram Nascimento *et al.* (2019), que descrevem a faixa de 25 a 35 °C como a mais adequada para a germinação da espécie.

Tabela 6. Germinação das sementes de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan, submetidas previamente à diferentes períodos de hidratação e posteriormente à quatro temperaturas. Serra Talhada – PE. 2025.

Hidratação (h)	Germinação (%)			
	Temperaturas (°C)			
	30	35	40	45
0	97 aA	89 aA	80 bA	1 cA
1	93 aA	86 aA	70 bB	1 cA
2	95 aA	76 bA	64 cB	0 dA
3	90 aA	89 aA	46 bC	0 bA

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% e probabilidade ($p < 0,05$).

Com o aumento da temperatura (Tabela 6) verificou-se que na ausência de hidratação e por ocasião da hidratação por 1 e 3 horas, a redução da germinação ocorreu à partir da temperatura de 40 °C, sendo que na temperatura de 45 °C, houve ausência de germinação para as sementes hidratadas por 3 horas. Com a hidratação das sementes por 2 horas, a redução da germinação já ocorreu à partir da temperatura de 35 °C, com ausência de germinação também sendo verificada à temperatura de 45 °C.

Os resultados da análise de variância do índice de velocidade de germinação (IVG) das sementes de angico são apresentados na Tabela 7. Verificou-se efeito significativo dos períodos de hidratação ($p = 0,0039$), das temperaturas de incubação ($p < 0,0001$) e da interação entre esses fatores ($p = 0,033$), indicando que a resposta do IVG ao hidrocondicionamento depende da temperatura de incubação.

Tabela 7. Quadro da análise de variância do índice de velocidade de germinação para as sementes de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan, submetidas previamente à diferentes períodos de hidratação e posteriormente à quatro temperaturas. Serra Talhada – PE. 2025.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F calculado	p-valor
Fator 1 (F1)	3	71,55	3	5,08	0,0039**
Fator 2 (F2)	3	1488,41	5	105,7	<0,0001***
Interação F1*F2	9	95,81	2	2,27	0,033*
Erro	48	225,29	4		
Total	63	1881,07			
CV (%)	29,78				

GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma de Quadrados; QM: Quadrado Médio; CV: Coeficiente de Variação; Fator 1: Períodos de hidratação (0, 1; 2 e 3h); Fator 2: Temperaturas (30, 35, 40 e 45 °C).

Considerando a interação significativa entre os períodos de hidratação e as temperaturas (Tabela 8), verificou-se redução do índice de velocidade de germinação com o aumento da temperatura, sendo essa resposta dependente do período de hidratação das sementes.

Tabela 8. Índice de velocidade de germinação (IVG) das sementes de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan, submetidas previamente à diferentes períodos de hidratação e posteriormente à quatro temperaturas. Serra Talhada PE, 2025.

Índice de Velocidade de Germinação				
Hidratação (h)	Temperaturas (°C)			
	30	35	40	45
0	15,24 aA	9,51 bA	9,89 bA	0,25 cA
1	14,74 aA	10,33 bA	6,01 cB	0,25 dA
2	11,04 aB	9,29 aA	5,08 bB	0 cA
3	11,10 aB	10,6 aA	2,99 bB	0 bA

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% e probabilidade ($p < 0,05$).

Nas sementes não hidratadas e naquelas hidratadas por 1 hora, a redução do IVG ocorreu a partir de 35 °C. Por outro lado, nas sementes submetidas à hidratação por 2 e 3 horas, esse declínio foi observado apenas a partir de 40 °C, indicando que, até esse limite de

temperatura, períodos mais prolongados de hidratação contribuíram para a manutenção da velocidade de germinação.

Quando analisados os períodos de hidratação dentro de cada temperatura, verificou-se que, a 30 °C, os menores valores de IVG ocorreram nas sementes hidratadas por 2 e 3 horas. Já a 40 °C, a hidratação reduziu o IVG independentemente do período, evidenciando que, sob condição de estresse térmico, o hidrocondicionamento não foi capaz de preservar a velocidade de germinação.

A redução da velocidade de germinação em temperaturas elevadas está associada às alterações fisiológicas e metabólicas provocadas pelo estresse térmico. Temperaturas acima da faixa ótima podem comprometer a atividade de enzimas envolvidas na mobilização das reservas, desestabilizar membranas celulares e intensificar a produção de espécies reativas de oxigênio, reduzindo a eficiência dos processos metabólicos necessários à protrusão da raiz primária (Bohm *et al.*, 2024).

Na temperatura de 45 °C, não foram observadas diferenças entre os períodos de hidratação e entre eles e a ausência de hidratação. Esse resultado decorre do severo comprometimento da germinação nessa condição, com germinação praticamente inexistente nas sementes sem hidratação e hidratadas por 1 hora, e ausência total de germinação nas sementes hidratadas por 2 e 3 horas, evidenciando que essa temperatura excede o limite de tolerância térmica das sementes de angico.

Tabela 8. Índice de velocidade de germinação (IVG) das sementes de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan, submetidas previamente à diferentes períodos de hidratação e posteriormente à quatro temperaturas. Serra Talhada PE, 2025.

Índice de Velocidade de Germinação				
Hidratação (h)	Temperaturas (°C)			
	30	35	40	45
0	15,24 aA	9,51 bA	9,89 bA	0,25 cA
1	14,74 aA	10,33 bA	6,01 cB	0,25 dA
2	11,04 aB	9,29 aA	5,08 bB	0 cA
3	11,10 aB	10,6 aA	2,99 bB	0 bA

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% e probabilidade ($p < 0,05$).

A análise de variância do tempo médio de germinação (Tabela 9) revelou efeito significativo da temperatura de incubação ($p < 0,0001$) e da interação entre temperatura e

períodos de hidratação ($p = 0,0109$), enquanto os períodos de hidratação, avaliados isoladamente, não apresentaram efeito significativo ($p = 0,4221$).

Tabela 9. Quadro da análise de variância do tempo médio de germinação (dias) para as sementes de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan, submetidas previamente à diferentes períodos de hidratação e posteriormente à quatro temperaturas. Serra Talhada – PE. 2025.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F calculado	p-valor
Fator 1 (F1)	3	0,715	2	0,95	0,4221
Fator 2 (F2)	3	106,631	5	142,29	<0,0001***
Interação F1*F2	9	6,211	4	2,76	0,0109*
Erro	48	11,99	3		
Total	63	125,547			
CV (%)	23,5				

GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma de Quadrados; QM: Quadrado Médio; CV: Coeficiente de Variação; Fator 1: Períodos de hidratação (0, 1; 2 e 3h); Fator 2: Temperaturas (30, 35, 40 e 45 °C).

Em relação ao tempo médio de germinação (TMG) (Tabela 10), o menor valor foi observado na temperatura de 45 °C. Entretanto, esse resultado deve ser interpretado com cautela, uma vez que, nessa condição, a germinação foi praticamente inexistente, o que reduz a representatividade desse parâmetro.

Desconsiderando essa condição extrema, verificou-se que as sementes sem hidratação e aquelas hidratadas por 1 hora apresentaram menor tempo médio de germinação quando submetidas à temperatura de 30 °C. Para as sementes hidratadas por 2 e 3 horas, os menores valores de TMG foram registrados nas temperaturas de 30 e 35 °C, indicando que essas condições favoreceram uma germinação mais rápida.

Tabela 10. Tempo médio de germinação (TMG), em dias, das sementes de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan, submetidas previamente à diferentes períodos de hidratação e posteriormente à quatro temperaturas. Serra Talhada – PE. 2025.

Tempo Médio de Germinação (dias)				
Hidratação (h)	Temperaturas (°C)			
	30	35	40	45
0	1,87 bA	2,97 aA	2,69 aB	0,25 cA
1	1,83 cA	2,76 bA	3,81 aA	0,25 dA
2	2,30 bA	2,43 bA	3,93 aA	0 cA
3	2,16 bA	2,51 bA	4,2 aA	0 cA

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% e probabilidade ($p < 0,05$).

Como houve interação significativa entre os períodos de hidratação e as temperaturas de incubação (Tabela 9), a interpretação do tempo médio de germinação (TMG) foi realizada considerando o comportamento conjunto desses fatores (Tabela 10). Nas temperaturas de 30 e 35 °C, os diferentes períodos de hidratação apresentaram comportamento semelhante, sem diferenças expressivas entre os tratamentos. Entretanto, na temperatura de 40 °C, observou-se que as sementes não hidratadas apresentaram menor tempo médio de germinação em comparação às sementes previamente hidratadas, evidenciando que o hidrocondicionamento retardou a germinação sob condição de estresse térmico. Na temperatura de 45 °C, os baixos valores de TMG estão associados à germinação praticamente inexistente nessa condição, razão pela qual esses resultados devem ser interpretados com cautela.

O comportamento observado pode estar relacionado ao aumento do teor de água das sementes durante a hidratação, uma vez que, dentro de determinados limites, existe relação linear positiva entre o teor de água e a intensidade do processo de deterioração (Marcos Filho, 2015). Sob temperaturas elevadas, esse processo tende a ser intensificado, favorecendo a desnaturação de proteínas, a desestruturação das membranas celulares e a peroxidação lipídica. Além disso, sementes em estado seco apresentam maior tolerância ao calor quando comparadas às previamente hidratadas. Assim, quando submetidas simultaneamente ao hidrocondicionamento e ao estresse térmico, o excesso de calor pode comprometer a integridade celular e a viabilidade das sementes, resultando em redução do desempenho germinativo e aumento dos danos fisiológicos (Novaes-Júnior *et al.*, 2012; Lopes *et al.*, 2022).

4. CONCLUSÕES

As temperaturas de 30 e 35 °C são as mais adequadas para a germinação de sementes de *Anadenanthera colubrina*, proporcionando melhor desempenho fisiológico.

O hidrocondicionamento por 1, 2 e 3 horas não foi eficiente para mitigar os efeitos do estresse térmico.

A ausência do hidrocondicionamento proporcionou desempenho germinativo igual ou superior ao observado nos períodos de hidratação prévia.

AGRADECIMENTOS

Ao Núcleo de Ecologia e Monitoramento Ambiental (NEMA/UNIVASF), no âmbito do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF) e do Ministério do Desenvolvimento Regional (Mdr), pela doação das sementes.

REFERÊNCIAS

- BOHM, F.Z.; ALMEIDA, B.B.; SOARES, L.G.J.; BOHM, P.A.F. Atenuação dos efeitos do estresse térmico em tomate submetidos ao pré-tratamento com ácido salicílico. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, [S. l.], v. 12, n. 3, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15051549>
- BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Sistema Integrado de Legislação. **Instrução Normativa MAPA 45/2013**, 2013.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instruções para análises de sementes de espécies vegetais**. Brasília, DF: MAPA/ACS, 2013.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para Análise de Sementes (RAS)**. Brasília, DF: MAPA/SDA, 2025.
- DANTAS, B.F. Germinação de sementes da Caatinga em um clima futuro. **Anais do II simpósio do Bioma Caatinga**. Embrapa Semiárido. p. 126-133, 2019.
- KRZYZANOWSKI, F.C.; DIAS, D.C.F.S.; FRANÇA-NETO, J.D.B.; Deterioração e vigor da semente. **Revista Seeds News**, v. 25, p. 14, 2022.
- LABOURIAU, L.G. **A germinação das sementes**. Washington: Secretaria da OEA. 173p. 1983.
- LOPES, G.B.; GOELZER, A.; ANDRADE, T. C. S.; MASETTO, T. E. O hidrocondicionamento pode ser uma estratégia para aumentar o desempenho das sementes de calêndula?

Brazilian Journal of Development, v. 8, n. 1, p. 6758-6769, 2022. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv8n1-456>

MAGUIRE, J.D. Seed of germination, aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, v. 2, p. 176-177, 1962.

MARCOS FILHO, J. **Seed Physiology of Cultivated Plants**. ABRATES, Piracicaba, 660 p., 2015

MEDEIROS, J. C. D.; BENDITO, P. C.; PEREIRA, K. T. O.; SILVA, K. C. N.; MAIA, J. H.; OLIVEIRA, H. L.; MEDEIROS, A. K. A.; Hidrocondicionamento, secagem e armazenamento em sementes de *Piptadenia moniliformis* Benth. **Brazilian Journal of Development**, v.7, p. 94181-94195, 2021

NASCIMENTO, J.P.B.; BISPO, J.S.; DANTAS, B.F. **Informativo Abrates**, v. 29, n. 1/3, p. 47-51, 2019.

NOVAES-JUNIOR, E.S.; VINHAL-FREITAS, I.C.; MATIAS, F.I.; FRANCO, L.D.P. Emergência e vigor de sementes de soja em função da disponibilidade hídrica do solo. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 7, n. 3, p. 46, 2012.

PAREYN, F.G.C.; ARAÚJO, E.L.; DRUMOND, M.A. *Anadenanthera colubrina*. **Plantas para o futuro - Região Nordeste**, p. 740-745, 2018.

CAPÍTULO XIV

HIDRATAÇÃO PRÉ-SEMEADURA E VIGOR DE SEMENTES DE *PTEROGYNE NITENS* (FABACEAE) SUBMETIDAS A DIFERENTES PERÍODOS DE EMBEBIÇÃO

PRE-SOWING HYDRATION AND VIGOR OF *PTEROGYNE NITENS* (FABACEAE) SEEDS SUBJECTED TO DIFFERENT IMBIBITION PERIODS

DOI: 10.51859/amplla.mac6200-14

Monalisa Alves Diniz da Silva¹

Agda Taynná de Amorim²

Kayque Eufrazio de Souza³

Tânia da Silva Siqueira

Mateus Ferreira Andrade

¹ Doutora em Agronomia (Produção e Tecnologia de Sementes) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP). Docente da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UFRPE/UASt).

² Mestranda em Produção Vegetal. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UFRPE/UASt)

³ Graduando em Agronomia. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UFRPE/UASt)

⁴ Doutoranda em Engenharia Agrícola. Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE)

⁵ Doutorando em Engenharia Agrícola. Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE)

RESUMO

Em virtude da importância da qualidade fisiológica das sementes para o estabelecimento de espécies florestais e dos efeitos do armazenamento sobre o vigor, objetivou-se avaliar o efeito de diferentes períodos de hidratação (0, 8 e 16 horas) sobre a qualidade fisiológica de sementes de *Pterogyne nitens*, provenientes de dois anos de coleta (2022 e 2023). Para tanto, conduziu-se um experimento em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3 × 2 (períodos de hidratação × anos de coleta). Foram avaliados emergência, comprimento e massa seca da parte aérea e do sistema radicular, número de folhas, diâmetro do caule, condutividade elétrica e teor de água. Observou-se interação significativa entre os fatores para a maioria das variáveis. A hidratação por oito horas promoveu maior emergência e crescimento inicial, especialmente para as sementes coletadas em 2022, enquanto o período de 16 horas favoreceu as características radiculares. Conclui-se que o hidropreimimento por oito horas é o período mais eficiente para melhorar o desempenho fisiológico das sementes.

Palavras-chave: Caatinga. Hidropreimimento. Potencial fisiológico. Restauração florestal.

ABSTRACT

Considering the importance of seed physiological quality for the establishment of forest species and the negative effects of storage on vigor, this study aimed to evaluate the effect of different hydration periods (0, 8 and 16 hours) on the physiological quality of *Pterogyne nitens* seeds collected in two different years (2022 and 2023). The experiment was conducted in a completely randomized design, in a 3 × 2 factorial scheme (hydration periods × collection years). The variables evaluated were emergence, shoot and root dry mass, shoot and root length, number of leaves, stem diameter, electrical conductivity, and water content. A significant interaction between factors was observed for most variables. Hydration for 8 hours promoted higher emergence and initial growth, especially in the 2022 lot, while 16 hours favored specific root characteristics. It can be concluded that hydropriming for 8 hours is the most efficient period to improve seed physiological performance, particularly after storage.

Keywords: Caatinga. Hydropriming, Seed vigor, Forest restoration.



1. INTRODUÇÃO

A perda da qualidade fisiológica de sementes durante o armazenamento representa um dos principais gargalos para a silvicultura de espécies nativas e a recuperação de ecossistemas degradados. Esse processo de deterioração é caracterizado por uma série de alterações degenerativas, como a desorganização do sistema de membranas e danos oxidativos, que resultam na redução do vigor e da capacidade germinativa (Walters *et al.*, 2019; Hay *et al.*, 2022). Em programas de restauração florestal, o uso de lotes com vigor comprometido reflete diretamente no baixo estabelecimento de plântulas em campo, elevando os custos e reduzindo a eficiência das ações de mitigação ambiental (Meiado *et al.*, 2016; FAO, 2022).

Para contornar os efeitos negativos da deterioração, técnicas de condicionamento fisiológico têm sido amplamente investigadas. O *hidropriming*, técnica que consiste na hidratação controlada das sementes até níveis que permitam a ativação do metabolismo pré-germinativo sem atingir a protrusão radicular, destaca-se como uma alternativa de baixo custo e alta viabilidade (Paparella *et al.*, 2015). Estudos recentes indicam que essa hidratação prévia favorece a reorganização das membranas celulares e ativa mecanismos de reparo de danos acumulados durante o armazenamento, promovendo uma emergência mais rápida e uniforme, mesmo sob condições ambientais adversas (Farooq *et al.*, 2019; Ibrahim, 2023).

No contexto de ecossistemas tropicais secos, como a Caatinga, a eficiência dessas técnicas torna-se ainda mais estratégica. A espécie *Pterogyne nitens* Tul. (madeira-nova) possui grande relevância ecológica e potencial madeireiro, sendo frequentemente utilizada em projetos de reflorestamento devido ao seu crescimento inicial vigoroso (Carvalho, 2003). Contudo, o sucesso do seu estabelecimento em áreas de restauração depende da qualidade das sementes utilizadas, as quais podem apresentar respostas diferenciais ao condicionamento hídrico dependendo do seu estado fisiológico inicial e tempo de armazenamento (Nascimento *et al.*, 2021).

Embora o *hidropriming* tenha demonstrado resultados positivos em diversas espécies florestais, a definição de protocolos específicos, como o tempo ideal de exposição à hidratação, é fundamental para evitar danos por embebição e maximizar os ganhos em vigor (Silva *et al.*, 2021). Investigar como sementes de diferentes anos de coleta reagem a esses

procedimentos de hidratação permite compreender melhor a longevidade da espécie e a plasticidade de sua resposta metabólica.

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes períodos de hidratação na qualidade fisiológica de sementes de *Pterogyne nitens* provenientes de dois anos de coleta (2022 e 2023). Parte-se da hipótese de que períodos moderados de hidratação podem mitigar os efeitos da deterioração em lotes de sementes armazenados, favorecendo a emergência e o vigor inicial das plântulas.

2. METODOLOGIA

O experimento foi conduzido em 2024 no Laboratório de Sementes e na área experimental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UFRPE/UAST), localizada no município de Serra Talhada, Pernambuco, Brasil (07°59'31" S e 38°17'54" O). Foram utilizadas sementes de *Pterogyne nitens* coletadas nos anos de 2022 e 2023 no município de Milagres- CE A doação das sementes foi realizada pelo Núcleo de Ecologia e Monitoramento Ambiental (NEMA), vinculado à Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), no âmbito das ações relacionadas ao Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF), em parceria com o Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR). No NEMA após o beneficiamento das sementes, as mesmas são distribuídas em sacos plásticos transparentes devidamente identificados e em seguida armazenadas em câmara fria regulada para 5-10 °C e 24-30% de umidade relativa do ar.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3×2 (três períodos de hidratação $\times$ dois anos de coleta). Os três períodos de hidratação na pré-semeadura foram: zero horas (controle), oito e 16 horas. A hidratação foi realizada em folhas de papel germitest umedecidas com água destilada, na proporção de 2,5 vezes a massa do papel seco. Após esse procedimento, as sementes foram acondicionadas em incubadora do tipo BOD, mantida a 25 °C.

Foram avaliadas as seguintes variáveis: emergência (E, %), obtida pela relação entre o número de plântulas emergidas e o número de sementes semeadas; número de folhas (NF), por contagem direta das folhas plenamente expandidas; diâmetro do caule (DC, mm), mensurado com paquímetro digital na região do colo; comprimento da parte aérea (CPA, cm) e comprimento do sistema radicular (CSR, cm) determinados com auxílio de régua

milimetrada massa seca da parte aérea (MSPA, g) e massa seca do sistema radicular (MSSR, g) obtidas após secagem do material vegetal em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até massa constante e posterior pesagem em balança analítica.

Para a determinação da condutividade elétrica (CE, $\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$), utilizaram-se quatro repetições de 25 sementes previamente pesadas, as quais foram imersas em recipientes contendo volume conhecido de água deionizada e mantidas em câmara BOD a 25 °C por 24 horas. Após esse período, procedeu-se à leitura em condutivímetro digital, sendo os valores corrigidos pela massa das sementes.

O teor de água (TA, %) foi determinado pelo método da estufa a 105 ± 3 °C por 24 horas, utilizando-se duas subamostras por tratamento, conforme as Regras para Análise de Sementes, e os resultados expressos em base úmida.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA). As médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R, versão 4.3.0 (R CORE TEAM, 2023).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. EMERGÊNCIA

A emergência de plântulas foi influenciada pelos períodos de hidratação, principalmente para aquelas provenientes das sementes coletadas em 2022, sendo que o período de oito horas proporcionou aumento expressivo na porcentagem de emergência em relação ao controle (Figura 1A). Esse resultado sugere que a hidratação controlada favoreceu a ativação metabólica das sementes antes da semeadura, contribuindo para maior capacidade de estabelecimento das plântulas. De acordo com Paparella *et al.* (2015), o processo de priming promove a ativação de eventos metabólicos associados à germinação, permitindo que etapas iniciais desse processo ocorram antes da semeadura, o que resulta em maior uniformidade e velocidade de emergência.

Além disso, Farooq *et al.* (2019) destacam que o condicionamento fisiológico das sementes pode melhorar significativamente a emergência em diferentes espécies vegetais, principalmente quando as sementes apresentam algum grau de deterioração. Isso explica o fato da hidratação ter apresentado maior efeito sobre as sementes coletadas em 2022, já que as mesmas permaneceram armazenadas por mais tempo.

3.2. COMPRIMENTO DA PARTE AÉREA

O comprimento da parte aérea apresentou valores superiores para as plântulas oriundas das sementes hidratadas por oito horas, especialmente quando as sementes foram coletadas em 2022 (Figura 1D). Esse resultado indica que o referido período de hidratação pode favorecer o crescimento inicial das plântulas, possivelmente por promover ativação metabólica adequada sem provocar excesso de embebição. Durante a fase inicial da germinação, a absorção de água desencadeia diversos processos fisiológicos, como a ativação de enzimas, a respiração celular e a síntese de proteínas, fundamentais para o desenvolvimento inicial das plântulas (Bewley *et al.*, 2013).

Assim, o condicionamento hídrico pode permitir que parte desses processos ocorra antes da semeadura, favorecendo o crescimento inicial após a emergência.

3.3. MASSA SECA DA PARTE AÉREA E DO SISTEMA RADICULAR

A massa seca da parte aérea e do sistema radicular apresentou variações em função dos períodos de hidratação e dos anos de coleta, sem, contudo, evidenciar tendência consistente de aumento com o prolongamento do período de embebição (Figuras 1B e 1C). De modo geral, a produção de biomassa em plântulas está diretamente associada ao vigor das sementes e à eficiência na mobilização e utilização das reservas armazenadas. Nesse sentido, sementes com maior vigor apresentam maior capacidade de translocação de reservas durante a germinação, favorecendo o crescimento inicial das plântulas (Marcos Filho, 2015).

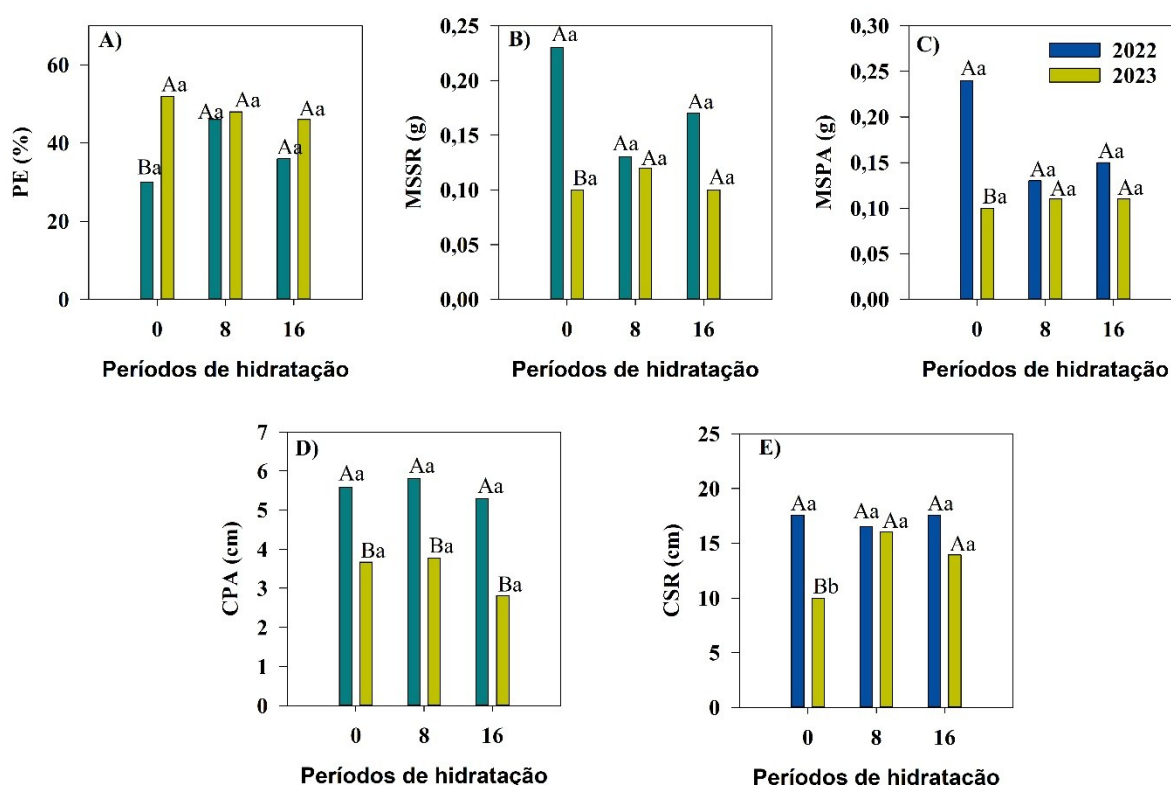
Por outro lado, períodos prolongados de hidratação podem resultar em absorção excessiva de água, levando a possíveis desequilíbrios fisiológicos e metabólicos. Esse comportamento pode explicar a ausência de incremento expressivo na biomassa das plântulas nos diferentes períodos de hidratação avaliados (0, 8 e 16 horas).

3.4. COMPRIMENTO DO SISTEMA RADICULAR

Para o comprimento do sistema radicular, observou-se tendência de maiores valores quando as sementes foram previamente hidratadas por 16 horas, principalmente para as que foram coletadas em 2022 (Figura 1E). O desenvolvimento radicular é uma característica importante para o estabelecimento inicial das plântulas, pois permite maior exploração do solo e maior capacidade de absorção de água e nutrientes.

Segundo Bewley *et al.* (2013), o crescimento inicial das raízes é um dos primeiros eventos após a germinação e depende diretamente da disponibilidade de água e da integridade fisiológica das sementes. Nesse sentido, a hidratação prévia pode favorecer a retomada das atividades metabólicas necessárias ao crescimento radicular.

Figura 1: Emergência (E%), massa seca do sistema radicular (MSSR - g), massa seca da parte aérea (MSPA - g), comprimento da parte aérea (CPA - cm) e comprimento do sistema radicular (CSR - cm) de plântulas de *Pterogyne nitens* oriundas de sementes coletadas em 2022 e 2023 no município de Milagres- CE, armazenadas e submetidas a diferentes períodos de hidratação. Serra Talhada - PE, 2024.



Médias seguidas por letras maiúsculas diferentes entre os anos de coleta e minúsculas entre os períodos de hidratação diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelos autores.

3.5. NÚMERO DE FOLHAS E DIÂMETRO DO CAULE

O número de folhas apresentou variações entre os períodos de hidratação, principalmente o período de 16 horas para as sementes coletadas em 2022. Enquanto que para as sementes coletadas em 2023, os valores permaneceram mais uniformes entre os períodos de hidratação (Figuras 2A e 2B). O desenvolvimento foliar está diretamente associado ao vigor das plântulas e à eficiência no estabelecimento inicial, uma vez que plântulas provenientes de sementes mais vigorosas tendem a apresentar maior crescimento vegetativo nas fases iniciais de desenvolvimento (Marcos Filho, 2015). Além disso, o

condicionamento fisiológico das sementes pode favorecer o crescimento inicial das plântulas ao antecipar processos metabólicos importantes para o desenvolvimento vegetal (Paparella *et al.*, 2015).

Por outro lado, o diâmetro do caule apresentou pequenas variações entre os períodos de hidratação, indicando menor sensibilidade dessa variável aos mesmos. Características morfológicas como o diâmetro do caule podem ser influenciadas por diversos fatores ambientais e fisiológicos, nem sempre respondendo diretamente a procedimentos e ou produtos aplicados às sementes, pois o desenvolvimento estrutural das plântulas depende da interação entre fatores genéticos, fisiológicos e ambientais (Bewley *et al.*, 2013; Marcos Filho, 2015).

3.6. CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

A condutividade elétrica apresentou redução com o aumento do período de hidratação, especialmente para as sementes coletadas em 2022 (Figura 2C). Esse resultado indica menor lixiviação de solutos durante a embebição das sementes, refletindo maior integridade das membranas celulares. O teste de condutividade elétrica é amplamente utilizado para avaliação do vigor de sementes, pois sementes mais deterioradas apresentam maior perda de eletrólitos durante a hidratação (Vieira *et al.*, 2004).

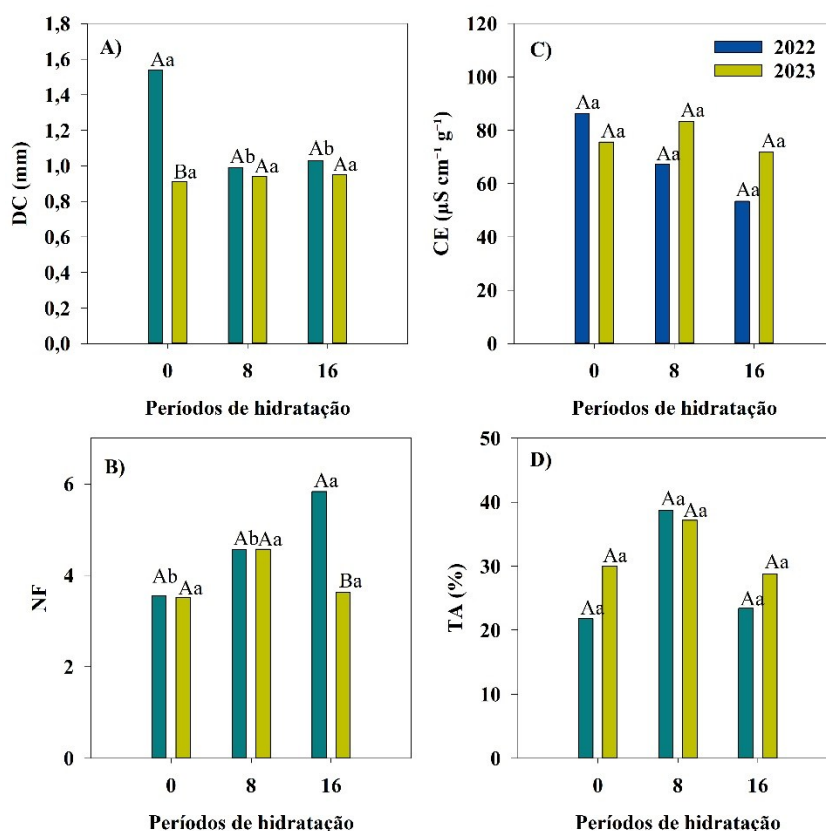
De acordo com Vanzolini *et al.* (2005), valores elevados de condutividade elétrica indicam maior grau de deterioração das sementes, uma vez que a desorganização das membranas celulares facilita o extravasamento de solutos. Dessa forma, a redução da condutividade elétrica após a hidratação sugere que o referido procedimento favoreceu a reorganização estrutural das membranas celulares.

3.7. TEOR DE ÁGUA

O teor de água aumentou progressivamente com o aumento do período de hidratação, comportamento esperado durante o processo de embebição das sementes (Figura 2D). A absorção de água representa a primeira etapa da germinação e desencadeia uma série de processos metabólicos fundamentais para o desenvolvimento das plântulas. Segundo Bewley *et al.* (2013), a embebição ocorre em fases distintas, envolvendo inicialmente rápida absorção de água, seguida por uma fase estacionária ou lag phase e, posteriormente, por um novo aumento do teor de água, culminando com a protrusão da raiz primária.

Assim, o aumento do teor de água observado com o aumento do período de hidratação confirma a ocorrência do processo de embebição e evidencia a ativação dos processos fisiológicos relacionados à germinação.

Figura 2: Número de folhas (NF), diâmetro do caule (DC - mm) de plântulas, condutividade elétrica (CE - $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$) e teor de água (TA %) de sementes de *Pterogyne nitens*, coletadas em 2022 e 2023 no município de Milagres-CE, armazenadas e submetidas a diferentes períodos de hidratação. Serra Talhada – PE, 2024.



Médias seguidas por letras maiúsculas diferentes entre os anos de coleta e minúsculas entre os períodos de hidratação diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelos autores.

4. CONCLUSÕES

A hidratação pré-semeadura influencia a qualidade fisiológica de sementes de *Pterogyne nitens*, apresentando resposta variável em função do ano de coleta. O período de hidratação de oito horas mostrou-se mais eficiente para promover maior emergência e melhor desempenho no crescimento inicial das plântulas.

Embora o período de hidratação de 16 horas tenha favorecido características relacionadas ao sistema radicular, como o comprimento radicular, esse efeito não foi consistente para as demais variáveis avaliadas.

O hidropriming por oito horas, antes da semeadura, é recomendado como prática complementar no manejo de sementes de *Pterogyne nitens*, contribuindo para a produção de mudas e a restauração florestal na Caatinga.

AGRADECIMENTOS

À FACEPE pela bolsa BIA concedida ao 3º autor.

Ao Núcleo de Ecologia e Monitoramento Ambiental (NEMA), Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), no âmbito das ações relacionadas ao Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF), em parceria com o Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR), pela doação das sementes.

REFERÊNCIAS

- BEWLEY, J. D.; BRADFORD, K. J.; HILHORST, H. W. M.; NONOGAKI, H. CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2003. v. 1.
- FAO - Food and Agriculture Organization. **The State of the World's Forests 2022**: Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies. Rome: FAO, 2022.
- FAROOQ, M. *et al.* Seed priming in field crops: potential benefits, adoption and challenges. **Field Crops Research**, v. 231, p. 1-22, 2019.
- HAY, F. R.; VALLES DE LA ROSA, C. S.; ELLIS, R. H. Understanding and managing the quality of stored seeds. **Seed Science and Technology**, v. 50, n. 1, 2022.
- IBRAHIM, E. A. Seed priming to alleviate abiotic stress in crops. **Plant Cell Reports**, v. 42, p. 1121–1145, 2023.
- MARCOS FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. 2. ed. Londrina: ABRATES, 2015.
- MEIADO, M. V. *et al.* Seedling establishment in the Caatinga: the role of seed physiological quality. In: **Forest Restoration in Dryland Ecosystems**. [S.l.]: Springer, 2016.
- NASCIMENTO, J. P. B.; DANTAS, B. F.; MEIADO, M. V. Hydropriming changes temperature thresholds for seed germination of tree species from the Caatinga, a Brazilian tropical dry forest. **Journal of Seed Science**, v. 43, e202143004, 2021.
- PAPARELLA, S. *et al.* Seed priming: state of the art and new perspectives. **Plant Cell Reports**, v. 34, p. 1281-1293, 2015.

- R CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 2 abr. 2026.
- SILVA, L. M.; NASCIMENTO, W. M.; SANTOS, H. O. Standardization of the electrical conductivity test for forest species seeds. **Seed Science and Technology**, v. 49, n. 2, p. 153-162, 2021.
- VANZOLINI, S. *et al.* Teste de condutividade elétrica em sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 27, n. 2, p. 120-125, 2005.
- VIEIRA, R. D.; KRZYŻANOWSKI, F. C.; FRANÇA-NETO, J. B. Teste de condutividade elétrica. In: KRZYŻANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA-NETO, J. B. (ed.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, 2004. p. 1-26.
- WALTERS, C.; BALLESTEROS, D.; VERTUCCI, C. W. Structural and thermodynamic aspects of seed longevity. In: **Seeds: The Ecology of Regeneration in Plant Communities**. 3. ed. [S.l.]: CABI, 2019.
- WALTERS, C.; WHEELER, L. M.; GROTE, A. M. Longevity of seeds stored in genebanks: species characteristics. **Seed Science Research**, v. 29, n. 1, p. 1-17, 2019.

CAPÍTULO XV

APLICAÇÃO DE MICRORGANISMOS NATIVOS DA AMAZÔNIA NA PROMOÇÃO DE CRESCIMENTO DE MUDAS ENXERTADAS DE CACAU (*THEOBROMA CACAO*)

APPLICATION OF NATIVE AMAZONIAN MICROORGANISMS TO PROMOTE THE GROWTH OF GRAFTED COCOA (*THEOBROMA CACAOL.*) SEEDLINGS

DOI: 10.51859/amplla.mac6200-15

Ricardo Christin Lobato Machado¹

Paula Daniele Martins Moraes¹

Vitoria Luiza Dos Passos²

Hanna Ferreira de Souza²

Marcele Farias Pereira³

Julia Isabella de Matos Rodrigues⁴

Gisele Barata da Silva⁵

¹ Doutorando em Ciências Florestais. Programa de Pós-graduação em Ciências florestais – UFRA

² Mestranda em Ciências Florestais. Programa de Pós-graduação em Ciências florestais – UFRA

³ Mestre em Ciências Florestais. Programa de Pós-graduação em Ciências florestais – UFRA

⁴ Doutora em Ciências Florestais. Programa de Pós-graduação em Ciências florestais – UFRA

⁵ Professora Titular. Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

RESUMO

A produção de mudas de qualidade é fundamental para o estabelecimento de cultivos de cacau (*Theobroma cacao* L.), sendo os microrganismos promotores de crescimento uma alternativa sustentável para incrementar o desenvolvimento vegetal. Neste estudo, avaliou-se o efeito de rizobactérias promotoras de crescimento de plantas (RBPC) e de *Trichoderma asperellum* no crescimento de mudas porta-enxerto e enxertadas de cacau. O experimento foi conduzido em viveiro, utilizando os tratamentos BRM32113, *Bacillus* sp., *T. asperellum*, mistura dos microrganismos (Mix) e controle sem aplicação. As avaliações das mudas porta-enxerto foram realizadas quatro meses após a aplicação dos microrganismos, enquanto as mudas enxertadas foram avaliadas quatro meses após a enxertia. A taxa de sobrevivência foi determinada 30 dias após a enxertia. Nas mudas porta-enxerto, *Bacillus* sp. proporcionou a maior altura média (55,59 cm), enquanto BRM32113 e Mix promoveram os maiores diâmetros de coleto (9,10 e 9,11 mm, respectivamente). Nas mudas enxertadas, o tratamento Mix apresentou o melhor desempenho em altura (53,00 cm), superando os

demais tratamentos. Para o diâmetro do coleto, BRM32113 apresentou os maiores valores (10,30 mm), diferindo significativamente do controle. A maior taxa de sobrevivência foi observada em BRM32113 (100%), seguida por *Bacillus* sp. (90%), enquanto o controle apresentou apenas 70% de sobrevivência. Os resultados demonstram que a aplicação de microrganismos nativos da Amazônia favorece o crescimento e a sobrevivência de mudas enxertadas de cacau, destacando-se o potencial de BRM32113 e da combinação dos microrganismos como ferramentas promissoras para a produção sustentável de mudas.

Palavras-chave: Rizobactérias promotoras de crescimento. *Trichoderma asperellum*. propagação vegetal. Viveiro. cacauicultura.

ABSTRACT

The production of high-quality seedlings is essential for the successful establishment of cocoa (*Theobroma cacao* L.) plantations, and plant growth-promoting microorganisms represent a sustainable alternative to enhance plant development. This study evaluated the effects of



plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and *Trichoderma asperellum* on the growth of cocoa rootstock and grafted seedlings. The experiment was conducted under nursery conditions using the following treatments: BRM32113, *Bacillus* sp., *T. asperellum*, a microbial consortium (Mix), and an untreated control. Rootstock seedlings were evaluated four months after microorganism application, whereas grafted seedlings were assessed nine months after application. Survival rate was determined 30 days after grafting. Among rootstock seedlings, *Bacillus* sp. promoted the greatest mean height (55.59 cm), while BRM32113 and Mix resulted in the largest stem diameters (9.10 and 9.11 mm, respectively). In grafted seedlings, the Mix treatment showed the highest plant height

(53.00 cm), outperforming the other treatments. For stem diameter, BRM32113 produced the highest values (10.30 mm), differing significantly from the control. The highest survival rate was observed with BRM32113 (100%), followed by *Bacillus* sp. (90%), whereas the control showed only 70% survival. These results demonstrate that the application of native Amazonian microorganisms enhances the growth and survival of grafted cocoa seedlings, highlighting the potential of BRM32113 and the microbial consortium as promising tools for sustainable seedling production.

Keywords: plant growth-promoting rhizobacteria. *Trichoderma asperellum*. plant propagation. nursery production. cocoa cultivation.

1. INTRODUÇÃO

O cacauieiro (*Theobroma cacao* L.) é uma espécie arbórea tropical originária da região amazônica, reconhecida pela elevada diversidade genética de suas populações e pela importância de suas amêndoas para a cadeia produtiva do chocolate e de outros derivados alimentícios (Motamayor et al., 2008). No Brasil, especialmente na Amazônia, o cultivo do cacau tem sido associado à recuperação produtiva de áreas alteradas e à consolidação de sistemas agroflorestais em áreas anteriormente ocupadas por pastagens ou agricultura convencional (Schroth et al., 2016). Contudo, o sucesso do estabelecimento dessas lavouras depende diretamente da produção de mudas vigorosas, sadias e uniformes, uma vez que a fase de viveiro influencia o desempenho inicial das plantas em campo (Sodré; Gomes, 2019). Características morfológicas como altura da planta, diâmetro do coleto e desenvolvimento radicular são utilizadas como indicadores de qualidade, pois se relacionam à sobrevivência, ao crescimento e à adaptação após o transplantio definitivo (Haase, 2007; Grossnickle; MacDonald, 2018).

Na produção de mudas de cacau, a enxertia é uma técnica amplamente utilizada por permitir a propagação vegetativa de materiais geneticamente superiores e a manutenção de características agrônômicas desejáveis da planta matriz (Sodré; Gomes, 2019). Essa técnica depende da interação funcional entre porta-enxerto e enxerto, sendo a compatibilidade entre os tecidos essencial para a formação adequada da união enxertada (Pina; Errea, 2005). Durante esse processo, ocorrem alterações anatômicas, fisiológicas e metabólicas que podem influenciar diretamente o pegamento, a sobrevivência e o crescimento inicial da muda

enxertada (Goldschmidt, 2014; Gainza et al., 2015). Assim, falhas de compatibilidade, estresse pós-enxertia e crescimento desuniforme podem elevar perdas no viveiro e comprometer a eficiência da produção de mudas clonais (Gainza et al., 2015; N’zi et al., 2023).

Diante desses desafios, a utilização de microrganismos promotores de crescimento de plantas constitui uma estratégia biológica promissora para melhorar o vigor de mudas e reduzir a dependência de insumos químicos em sistemas agrícolas (Backer et al., 2018; Olanrewaju et al., 2017). Rizobactérias promotoras de crescimento de plantas, incluindo espécies do gênero *Bacillus*, podem favorecer o desenvolvimento vegetal por meio da produção de fitormônios, solubilização de nutrientes, colonização radicular e indução de tolerância a estresses bióticos e abióticos (Vacheron et al., 2013; Blake et al., 2021). Em cacau, bactérias endofíticas como *Bacillus subtilis* e *Enterobacter cloacae* foram capazes de colonizar sistemicamente mudas e promover crescimento vegetal (Azevedo; Quecine, 2019). Além disso, *Bacillus subtilis* ALB629, isolado de cacau, demonstrou capacidade de promover crescimento radicular e da parte aérea de mudas, além de apresentar atividade antimicrobiana (Falcão et al., 2014).

Fungos do gênero *Trichoderma* também são reconhecidos por colonizar raízes, estimular o crescimento vegetal, melhorar a absorção de nutrientes e contribuir para a proteção contra fitopatógenos (Harman et al., 2004; Woo et al., 2014). Em mudas de cacau, isolados de *Trichoderma* avaliados no tratamento de sementes e na produção de mudas favoreceram variáveis de germinação, crescimento inicial e desenvolvimento radicular (Sousa et al., 2021). Estudos com *Trichoderma asperellum* em cacau também indicam capacidade de associação endofítica e colonização de tecidos vegetais, reforçando seu potencial como agente biológico associado à cultura (Rosmana et al., 2019). Dessa forma, tanto bactérias promotoras de crescimento quanto fungos benéficos apresentam potencial para melhorar o desempenho de mudas de cacau em condições de viveiro.

A relevância da aplicação desses agentes biológicos é ampliada quando se considera a elevada biodiversidade microbiana dos ecossistemas amazônicos, que representa uma fonte estratégica de microrganismos com potencial biotecnológico para uso agrícola (Mendes et al., 2013; Compant et al., 2019). Microrganismos nativos tendem a apresentar maior adaptação às condições ambientais locais, o que pode favorecer sua sobrevivência, colonização e eficiência funcional quando aplicados em sistemas produtivos da própria região (Berg et al., 2014; Compant et al., 2019). No caso do cacau, o uso de isolados provenientes da própria

região amazônica é especialmente relevante, pois estudos com *Trichoderma* amazônicos demonstraram potencial de aplicação no tratamento de sementes e produção de mudas de *Theobroma cacao* (Sousa et al., 2021). Assim, a prospecção de microrganismos nativos da Amazônia representa uma alternativa estratégica para associar inovação agrícola, valorização da biodiversidade regional e sustentabilidade na produção de mudas de cacau (Mitter et al., 2021).

Apesar dos benefícios documentados para diferentes culturas e dos avanços obtidos com microrganismos associados ao cacau, ainda são escassas as informações sobre a aplicação de cepas nativas amazônicas de rizobactérias promotoras de crescimento e de *Trichoderma asperellum* na produção de mudas porta-enxerto e enxertadas de cacau. Essa lacuna é relevante porque a fase de viveiro e o período pós-enxertia são etapas sensíveis, nas quais o crescimento vegetativo e a sobrevivência das mudas podem determinar a eficiência do sistema de produção (Sodré; Gomes, 2019). Considerando os mecanismos de promoção de crescimento descritos para RBPC e *Trichoderma*, questiona-se se a aplicação desses microrganismos, isoladamente ou em consórcio, é capaz de favorecer o crescimento e reduzir perdas em mudas de cacau produzidas em viveiro (Falcão et al., 2014; de Sousa et al., 2021).

A hipótese deste estudo é que a inoculação de rizobactérias promotoras de crescimento e de *Trichoderma asperellum*, isoladamente ou em consórcio, favorece o crescimento vegetativo das mudas, refletido em maiores valores de altura e diâmetro do coleto, além de aumentar a sobrevivência após a enxertia. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de microrganismos nativos da Amazônia sobre o crescimento e a sobrevivência de mudas porta-enxerto e enxertadas de cacau (*Theobroma cacao* L.) produzidas em viveiro.

2. METODOLOGIA

2.1. LOCALIZAÇÃO DO ENSAIO

O ensaio experimental foi realizado no viveiro de produção de mudas da CAMTA (Cooperativa Agrícola Mista de Tomé-Açu), localizado no município de Tomé-Açu, nordeste paraense.

2.2. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTO

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), composto por cinco tratamentos e 20 repetições, sendo cada repetição representada por uma muda. Os tratamentos utilizados constam na tabela a seguir (Tabela 1).

Tabela 1 - Tratamentos microbiológicos utilizados na produção de mudas de cacau (*Theobroma cacao*), contendo os isolados e espécies de microrganismos aplicados.

Tratamento	Isolado	Espécie
T1	BRM32113	<i>Burkholderia pyrrocinia</i>
T2	R-42	<i>Bacillus</i> spp.
T3	Trichoderma	<i>Trichoderma asperellum</i>
T4	Mix	<i>Bacillus</i> spp. + <i>Trichoderma asperellum</i>
T5	Controle	Controle

Os microrganismos utilizados fazem parte da coleção de microrganismos do Laboratório de Proteção de Plantas da Universidade Federal Rural da Amazônia (LPP-UFRA).

Os isolados bacterianos foram retirados dos microtubos de conservação e cultivadas em placas de Petri contendo meio de cultura 523 de Kado e Heskett (1970), sob temperatura de $26^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, por 24h. Após o crescimento, foi realizada a suspensão bacteriana e a concentração foi ajustada para 10^8 UFC.mL⁻¹ com auxílio de espectrofotômetro com 550nm de absorvância ($A_{550} = 0,1$).

Os isolados de *T. asperellum* foram retirados de tubos de conservação e cultivados em meio de cultura BDA (batata, dextrose e ágar) por sete dias, incubados em temperatura ambiente e iluminação constante. Após o crescimento das colônias foi realizado a suspensão de conídios por meio da raspagem das colônias com água destilada estéril e alça de Drigalski, a concentração de conídios foi ajustada com auxílio da câmara de Neubauer 10^8 UFC.mL⁻¹, foram aplicados 50 mL de suspensão de microrganismos por planta, as plantas controle receberam água no lugar da suspensão.

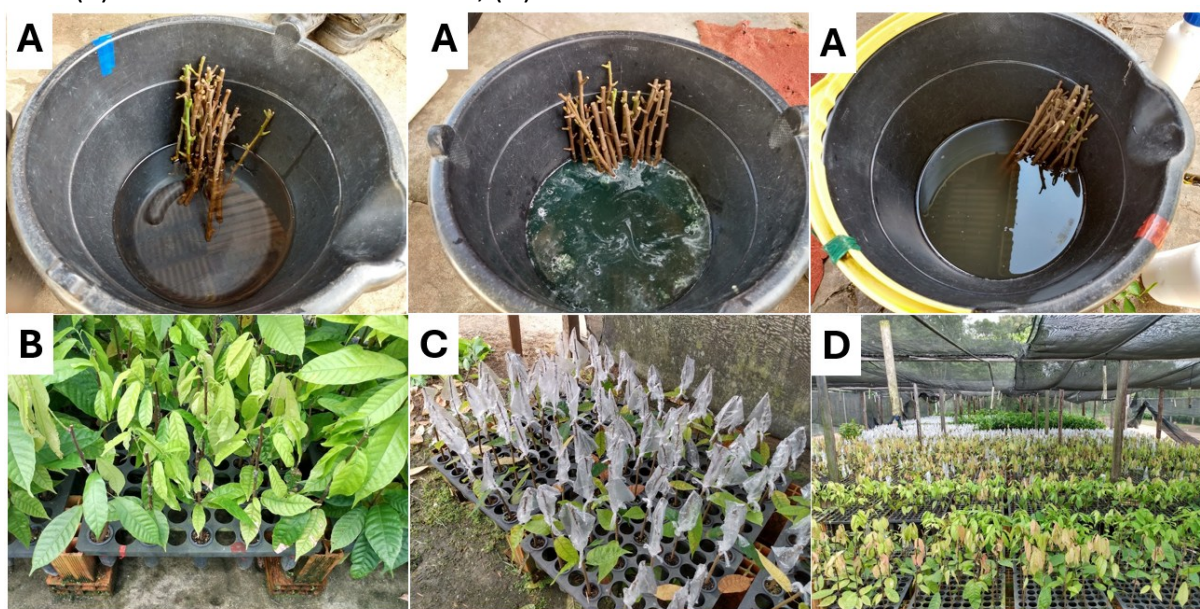
2.3. MATERIAL VEGETAL

A produção das mudas enxertadas seguiu o protocolo de enxertia da própria cooperativa com diferença que foram suspensas somente a aplicação dos defensivos agrícolas. As mudas porta-enxertos foram produzidas a partir de sementes e os enxertos foram obtidos de brotos da mesma planta matriz.

Inicialmente, os microrganismos foram aplicados nas mudas porta-enxerto de cacau. Após quatro meses da aplicação, foram realizadas as avaliações biométricas dessas mudas. Em seguida, procedeu-se à enxertia, utilizando estacas previamente submersas nas respectivas suspensões de microrganismos por 20 minutos antes da realização do enxerto. No tratamento controle, as estacas foram submersas apenas em água (Figura 1).

Após a enxertia, os microrganismos foram novamente aplicados nas mudas enxertadas. A taxa de sobrevivência dos enxertos foi avaliada 30 dias após a enxertia. Posteriormente, as mudas permaneceram em desenvolvimento até a realização das avaliações biométricas, conduzidas quatro meses após a enxertia.

Figura 1 – (A) Estacas em suspensão de microrganismos, (B) mudas porta-enxerto de cacau, (C) mudas enxertadas de cacau, (D) viveiro de mudas onde foi realizado o trabalho



Fonte: Autoria própria.

As mudas permaneceram durante todo o ensaio em casa de vegetação da CAMTA sob tela sombrite 30 (30% de retenção da luminosidade solar). As mudas foram molhadas diariamente por aspersores giratórios regulado de acordo os protocolos da CAMTA.

2.4. AVALIAÇÕES BIOMÉTRICAS

As avaliações biométricas foram realizadas por meio da mensuração da altura das plantas e do diâmetro do coleto. A altura foi determinada utilizando fita métrica graduada em centímetros, medindo-se a distância entre a base da muda, até o ápice da planta. O diâmetro do coleto foi obtido com auxílio de paquímetro digital com precisão de 0,01 mm, realizando-

se as leituras aproximadamente a 1 cm acima da superfície do substrato. Os resultados foram expressos em centímetros (cm) para altura e milímetros (mm) para diâmetro do coleto.

As avaliações biométricas foram realizadas nas mudas porta-enxerto aos quatro meses após a aplicação dos microrganismos e nas mudas enxertadas, também aos quatro meses após a aplicação dos microrganismos. Além das avaliações biométricas, a taxa de sobrevivência das mudas enxertadas foi determinada aos 30 dias após a enxertia, por meio da contagem do número de mudas vivas em relação ao total de mudas enxertadas em cada tratamento, sendo os resultados expressos em porcentagem (%).

2.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Inicialmente, os dados foram submetidos à verificação dos pressupostos de normalidade dos resíduos e homogeneidade das variâncias. Posteriormente, realizou-se análise de variância (ANOVA) para verificar o efeito dos tratamentos sobre as variáveis avaliadas. Quando constatado efeito significativo pelo teste F ($p \leq 0,05$), as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Os resultados foram expressos em média $\pm$ erro padrão da média. As análises estatísticas foram realizadas no *software* R, utilizando os pacotes *readxl*, *dplyr* e *agricolae*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os isolados utilizados influenciaram significativamente o crescimento das mudas de cacau tanto na fase de porta-enxerto quanto após a enxertia (Tabela 2). Na fase de porta-enxerto, o tratamento com R-42 promoveu a maior altura das mudas (55,59 cm), diferindo dos demais tratamentos (Figura 2). Para o diâmetro do coleto, os maiores valores foram observados nos tratamentos com BRM32113 e Mix.

Tabela 2. Altura, diâmetro do coleto e taxa de sobrevivência de mudas de cacau na fase de porta-enxerto e após a enxertia, submetidas à aplicação de diferentes microrganismos.

Tratamento	Porta-enxerto		Muda enxertada		
	Altura (cm)	Coleto (mm)	Altura (cm)	Coleto (mm)	Taxa (%)
BRM32113	53,09 $\pm$ 2,40 b	9,10 $\pm$ 0,39 a	49,80 $\pm$ 2,30 b	10,30 $\pm$ 0,56 a	100
R-42	55,59 $\pm$ 2,51 a	8,39 $\pm$ 0,31 b	48,40 $\pm$ 2,40 b	9,80 $\pm$ 0,50 b	90
<i>T. asperellum</i>	53,19 $\pm$ 2,32 b	8,30 $\pm$ 0,30 b	43,20 $\pm$ 3,04 c	10,00 $\pm$ 0,55 ab	80
Mix	49,91 $\pm$ 2,09 c	9,11 $\pm$ 0,43 a	53,00 $\pm$ 3,35 a	10,00 $\pm$ 0,44 ab	85

Tratamento	Porta-enxerto		Muda enxertada		
	Altura (cm)	Coleta (mm)	Altura (cm)	Coleta (mm)	Taxa (%)
Controle	47,59 ± 2,28 d	8,40 ± 0,49 b	41,21 ± 2,73 c	9,30 ± 0,58 c	70

Os valores correspondem à média ± erro padrão da média. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$)

Após a enxertia, o tratamento Mix proporcionou a maior altura das mudas (53,00 cm), diferindo significativamente dos demais tratamentos. Em relação ao diâmetro do coleto, o tratamento com BRM32113 apresentou o maior valor (10,30 mm) (Figura 3). Quanto à taxa de sobrevivência dos enxertos, o tratamento com BRM32113 apresentou 100% de sobrevivência, seguido por R-42 (90%), Mix (85%) e *T. asperellum* (80%), enquanto o controle apresentou a menor taxa de sobrevivência (70%).

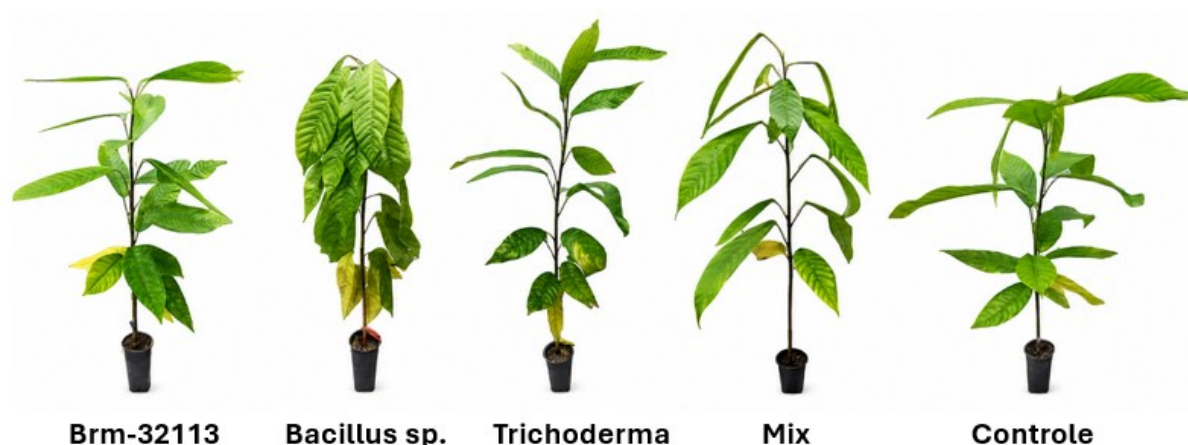
Os resultados demonstram que a aplicação de microrganismos benéficos influenciou positivamente o crescimento e a sobrevivência das mudas de cacau. Na fase de porta-enxerto, o tratamento com *Bacillus* sp. (R-42) promoveu maior crescimento em altura, sugerindo a capacidade desse microrganismo em estimular o desenvolvimento vegetal. Espécies do gênero *Bacillus* são amplamente reconhecidas como rizobactérias promotoras de crescimento de plantas, atuando por mecanismos como produção de fitormônios, solubilização de nutrientes e estímulo ao desenvolvimento radicular (Wang et al., 2024).

Por sua vez, *Burkholderia pyrocinia* (BRM32113) proporcionou maior diâmetro do coleto na fase de porta-enxerto e após a enxertia, além de apresentar a maior taxa de sobrevivência dos enxertos. O aumento do diâmetro do coleto é uma característica importante para a qualidade das mudas, pois está associado ao maior vigor e à melhor capacidade de estabelecimento após o transplante (Han et al., 2023). A elevada sobrevivência observada nesse tratamento sugere que a bactéria pode ter contribuído para uma melhor integração entre porta-enxerto e enxerto, favorecendo a recuperação das mudas após o procedimento.

Após a enxertia, o tratamento Mix destacou-se por promover maior crescimento em altura das mudas. Esse resultado pode estar relacionado à ação complementar entre *Bacillus* sp. e *Trichoderma asperellum*, uma vez que ambos os microrganismos apresentam potencial para estimular o crescimento vegetal por diferentes mecanismos. Além de atuar no desenvolvimento das plantas, *T. asperellum* é conhecido por favorecer a absorção de

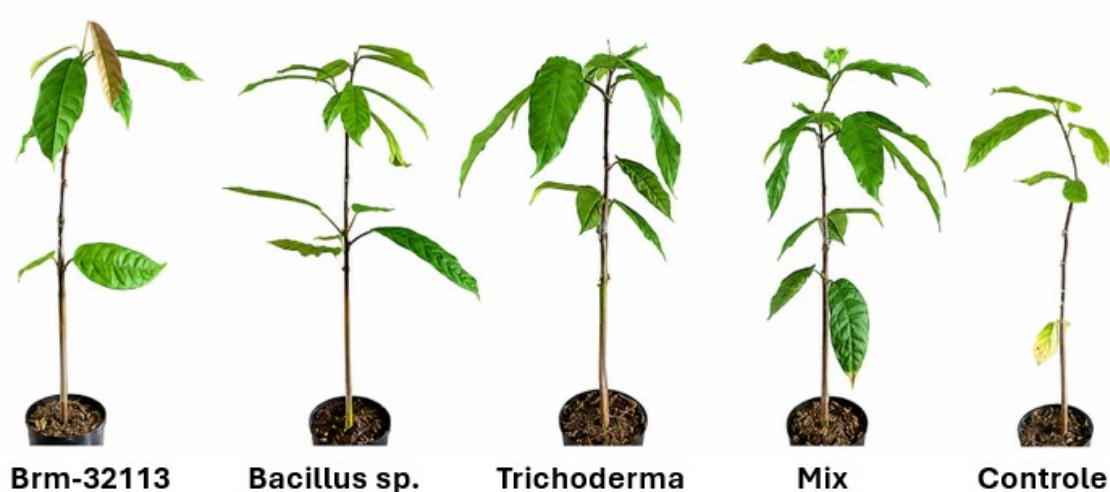
nutrientes e melhorar o desempenho fisiológico das mudas, o que pode ter contribuído para o crescimento observado (Harman et al., 2004).

Figura 2. Mudanças porta-enxerto de cacau, após quatro meses da aplicação dos microrganismos promotores de crescimento.



De maneira geral, os tratamentos microbiológicos apresentaram desempenho superior ao controle para a maioria das variáveis avaliadas, evidenciando o potencial do uso de microrganismos benéficos na produção de mudas de cacau. Esses resultados indicam que a inoculação microbiana pode ser uma estratégia promissora para aumentar a qualidade das mudas e melhorar o sucesso da enxertia, contribuindo para sistemas de produção mais eficientes e sustentáveis.

Figura 3. Mudanças enxertadas de cacau, após quatro meses da aplicação dos microrganismos promotores de crescimento.



Dessa forma, o uso de microrganismos promotores de crescimento apresenta potencial para ser incorporado aos programas de produção de mudas de cacau, visando à obtenção de plantas mais vigorosas e com maior qualidade para implantação em campo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação de microrganismos benéficos promoveu melhorias no crescimento e na sobrevivência de mudas de cacau. *Burkholderia pyrrocinia* destacou-se pelo maior diâmetro do coleto e pela maior taxa de sobrevivência dos enxertos, enquanto o tratamento Mix favoreceu o crescimento em altura das mudas enxertadas. Assim, o uso desses microrganismos apresenta potencial para aprimorar a produção de mudas de cacau.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido por meio de bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, J. L.; QUECINE, M. C. Biodiversity and biotechnological applications of microorganisms associated with tropical plants. In: KUMAR, V.; PRASAD, R.; KUMAR, M. (Eds.). *Microbiome in Plant Health and Disease: Challenges and Opportunities*. Singapore: Springer, 2019. p. 293–313. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8495-0_13
- BACKER, R.; ROKEM, J. S.; ILANGUMARAN, G.; LAMONT, J.; PRASLICKOVA, D.; RICCI, E.; SMITH, D. L. Plant growth-promoting rhizobacteria: mechanisms and applications. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 2, p. 147, 2018. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00147>
- BERG, G.; GRUBE, M.; SCHLOTTER, M.; SMALLA, K. The plant microbiome and its importance for plant and human health. **Frontiers in Microbiology**, v. 5, p. 491, 2014. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00491>
- COMPANT, S.; SAMAD, A.; FAIST, H.; SESSITSCH, A. A review on the plant microbiome: ecology, functions and emerging trends. **Microbiome**, v. 7, p. 29, 2019. <https://doi.org/10.1186/s40168-019-0667-0>
- DE SOUSA, M. V.; POMELLA, A. W. V.; COSTA, J. C. B.; LUZ, E. D. M. N. et al. Evaluation of *Trichoderma* spp. isolates in cocoa seed treatment and seedling production. **Plants**, v. 10, n. 9, p. 1964, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10091964>
- FALCÃO, L. L.; SILVA-WERNECK, J. O.; VILARINHO, B. R.; SILVA, J. P.; POMELLA, A. W. V.; MARCELLINO, L. H. Antimicrobial and plant growth-promoting properties of the cacao

- endophyte *Bacillus subtilis* ALB629. **Journal of Applied Microbiology**, v. 116, n. 6, p. 1584–1592, 2014. <https://doi.org/10.1111/jam.12485>
- GAINZA, F.; OPAZO, I.; MUÑOZ, C.; MEZA, P. Graft incompatibility in plants: metabolic and anatomical aspects. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 75, supl. 1, p. 18–24, 2015. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392015000300003>
- GOLDSCHMIDT, E. E. Plant grafting: new mechanisms, evolutionary implications. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, p. 727, 2014. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00727>
- GROSSNICKLE, S. C.; MACDONALD, J. E. Why seedlings survive: influence of plant attributes. **New Forests**, v. 49, p. 711–738, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11056-018-9649-6>
- HAASE, D. L. Morphological and physiological evaluations of seedling quality. In: RILEY, L. E.; DUMROESE, R. K.; LANDIS, T. D. (Eds.). *National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations*. Fort Collins: USDA Forest Service, 2007. p. 3–8.
- HAN, L., ZHANG, H., BAI, X. *et al.* The peanut root exudate increases the transport and metabolism of nutrients and enhances the plant growth-promoting effects of *burkholderia pyrrocinia* strain P10. **BMC Microbiol**, v.23, n. 85, 2023. <https://doi.org/10.1186/s12866-023-02818-9>
- HARMAN, G. E.; HOWELL, C. R.; VITERBO, A.; CHET, I.; LORITO, M. *Trichoderma* species—opportunistic, avirulent plant symbionts. **Nature Reviews Microbiology**, v. 2, n. 1, p. 43–56, 2004. <https://doi.org/10.1038/nrmicro797>
- MITTER, B.; BRADER, G.; PFAFFENBICHLER, N.; SESSITSCH, A. *et al.* Next generation microbiome applications for crop production. **Trends in Biotechnology**, v. 39, n. 7, p. 631–644, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.09.006>
- MOTAMAYOR, J. C.; RISTERUCCI, A. M.; LOPEZ, P. A.; ORTIZ, C. F.; MORENO, A.; LANAUD, C. Geographic and genetic population differentiation of the Amazonian chocolate tree (*Theobroma cacao* L.). **PLoS ONE**, v. 3, n. 10, e3311, 2008. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003311>
- OLANREWAJU, O. S.; GLICK, B. R.; BABALOLA, O. O. Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 33, p. 197, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2364-9>
- PINA, A.; ERREA, P. A review of new advances in mechanism of graft compatibility–incompatibility. **Scientia Horticulturae**, v. 106, n. 1, p. 1–11, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2005.04.003>
- ROSMANA, A.; TAUFIK, M.; ASMAN, A.; JAYANTI, N. J.; HAKKAR, A. A. Dynamics of vascular-streak dieback disease incidence in susceptible cacao treated with composted plant residues and *Trichoderma asperellum* in the field. **Agronomy**, v. 9, n. 10, p. 650, 2019. <https://doi.org/10.3390/agronomy9100650>

- SCHROTH, G.; LÄDERACH, P.; MARTINEZ-VALLE, A. I.; BUNN, C.; JASSOGNE, L. Vulnerability to climate change of cocoa in West Africa: patterns, opportunities and limits to adaptation. **Science of the Total Environment**, v. 556, p. 231–241, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.024>
- SODRÉ, G. A.; GOMES, A. R. S. Technologies for cocoa propagation and seedling production. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 41, n. 2, e-997, 2019. <https://doi.org/10.1590/0100-29452019997>
- VACHERON, J.; DESBROSSES, G.; BOUFFAUD, M. L.; TOURAINE, B.; MOËNNE-LOCCOZ, Y.; MULLER, D.; WISNIEWSKI-DYÉ, F.; PRIGENT-COMBARET, C. Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, p. 356, 2013. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00356>
- WANG, Y.; PEI, Y.; WANG, X.; DAI, X.; ZHU, M. Antimicrobial metabolites produced by the plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): *Bacillus* and *Pseudomonas*. **Advanced Agrochem**, v. 3, n. 3, p. 206–221, set. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.aac.2024.05.004>
- WOO, S. L.; RUOCCO, M.; VINALE, F.; NIGRO, M.; MARRA, R.; LOMBARDI, N.; PASCALE, A.; LANZUISE, S.; MANGANIELLO, G.; LORITO, M. *Trichoderma*-based products and their widespread applications in agriculture. **Microbial Biotechnology**, v. 7, n. 1, p. 17–34, 2014. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12093>

CAPÍTULO XVI

ADUBAÇÃO FOSFATADA NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE *HYMENAEA COURBARIL* L. PARA RESTAURAÇÃO DE ECOSISTEMAS DEGRADADOS

PHOSPHATE FERTILIZATION IN THE PRODUCTION OF *HYMENAEA COURBARIL* L. SEEDLINGS FOR THE RESTORATION OF DEGRADED ECOSYSTEMS

DOI: 10.51859/amplla.mac6200-16

Rebeca da Rocha Rodrigues de Oliveira ¹

Marcele Farias Pereira ²

Brenda Rayana Ferreira da Silva ³

Luiz Rodrigues de Sena ⁴

Luis Felipe Azevedo Batista ⁵

Elizabeth Santos Cordeiro Shimizu ⁶

¹ Mestranda em Ciências Florestais. Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA

² Mestra em Ciências Florestais. Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA

³ Mestranda em Ciências Ambientais. Instituto Tecnológico Vale – ITV

⁴ Mestrando em Ciências Biológicas/Botânica tropical. Museu Paraense Emílio Goeldi – MPEG

⁵ Engenheiro Florestal. Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

⁶ Mestra em Ciências Florestais. Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

RESUMO

A produção de mudas de espécies florestais nativas é fundamental para programas de restauração ecológica e recuperação de áreas degradadas. Nesse contexto, *Hymenaea courbaril* L. (jatobá) destaca-se por sua importância ecológica, econômica e potencial de utilização em projetos de recomposição florestal. Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes doses de superfosfato simples sobre a emergência, o crescimento inicial e a qualidade de mudas de *H. courbaril* produzidas em viveiro. O experimento foi conduzido na Embrapa Amazônia Oriental, em Belém, Pará. As sementes foram submetidas à escarificação mecânica seguida de embebição em água por 48 horas e semeadas em substrato composto por areia e serragem esterilizadas. As plântulas foram transplantadas para recipientes contendo terra preta e composto orgânico, submetidos a três tratamentos: controle, 800 mg L⁻¹ e 2400 mg L⁻¹ de superfosfato simples. Foram avaliadas a emergência, altura, diâmetro do colo, massa seca total, relações H/Ø e MSPA/MSR e Índice de Qualidade de Dickson. O tratamento pré-

germinativo proporcionou 88% de emergência e tempo médio de emergência de 12 dias. A adubação fosfatada promoveu incrementos significativos na altura e no diâmetro do colo das mudas aos 60 dias após o transplante, com destaque para a dose de 2400 mg L⁻¹. Os resultados indicaram que o uso de superfosfato simples associado a substratos orgânicos constitui uma alternativa promissora para a produção sustentável de mudas de jatobá destinadas à restauração ecológica.

Palavras-chave: Jatobá. Adubação fosfatada. Viveiro florestal. Qualidade de mudas. Restauração ecológica.

ABSTRACT

The production of native forest seedlings is essential for ecological restoration and degraded land recovery programs. In this context, *Hymenaea courbaril* L. (jatobá) stands out due to its ecological and economic importance, as well as its potential use in forest restoration projects. This study aimed to evaluate the effect of different doses of single superphosphate on the emergence, initial growth,



and quality of *H. courbaril* seedlings produced in a nursery. The experiment was conducted at Embrapa Eastern Amazon, in Belém, Pará, Brazil. Seeds were subjected to mechanical scarification followed by soaking in water for 48 hours and then sown in a substrate composed of sterilized sand and sawdust. The seedlings were transplanted into containers filled with black soil and organic compost and subjected to three treatments: control, 800 mg L⁻¹, and 2400 mg L⁻¹ of single superphosphate. Emergence, seedling height, stem diameter, total dry mass, H/Ø and MSPA/MSR ratios, and the Dickson Quality Index were evaluated. The pre-

germination treatment resulted in 88% emergence and a mean emergence time of 12 days. Phosphorus fertilization promoted significant increases in seedling height and stem diameter 60 days after transplanting, with the best performance observed at the dose of 2400 mg L⁻¹. The results indicate that the use of single superphosphate associated with organic substrates is a promising alternative for the sustainable production of jatobá seedlings intended for ecological restoration.

Keywords: Jatobá. Phosphorus fertilization. Forest nursery. Seedling quality. Ecological restoration.

1. INTRODUÇÃO

A degradação de ecossistemas florestais na Amazônia e em outros biomas brasileiros tem se intensificado nas últimas décadas em decorrência da expansão agropecuária, mineração, urbanização e queimadas (Lapola *et al.*, 2023). Diante disso, a recuperação de áreas degradadas tornou-se uma estratégia fundamental para a conservação da biodiversidade e a restauração dos serviços ecossistêmicos, destacando-se o uso de espécies nativas adaptadas às condições locais (Souza *et al.*, 2012; Costa *et al.*, 2011).

Entre as espécies com potencial para programas de restauração destaca-se o jatobá (*Hymenaea courbaril* L.), pertencente à família Fabaceae. A espécie apresenta ampla distribuição na Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica, além de reconhecida importância ecológica e econômica (Lcosseli *et al.*, 2017). Os frutos são fonte de alimento para a fauna silvestre, contribuindo para a dispersão de sementes, enquanto sua madeira possui elevado valor comercial devido à resistência e durabilidade (Carvalho, 1994; Fernandes, 2006; Schulze; shanley, 2010; Pinto *et al.*, 2020).

Apesar de seu potencial, a produção de mudas de qualidade ainda representa um desafio para a utilização da espécie em larga escala (Carvalho *et al.*, 2020). O crescimento e o desempenho das mudas são influenciados por fatores como qualidade do substrato e disponibilidade de nutrientes (Vieira *et al.*, 2015; Amorin *et al.*, 2020). Entre estes, o fósforo desempenha papel essencial no metabolismo energético, na divisão celular e no desenvolvimento do sistema radicular, entretanto, sua disponibilidade é frequentemente limitada em solos tropicais devido aos processos de adsorção por compostos de ferro e alumínio (Taiz *et al.*, 2006; Zaia *et al.*, 2008).

A adubação fosfatada pode favorecer o crescimento inicial das mudas e reduzir o tempo necessário para sua formação em viveiro (Prado *et al.*, 2005; Leite *et al.*, 2014). Contudo, ainda são escassas as informações sobre a resposta de mudas de *H. courbaril* à aplicação de fósforo, especialmente em substratos contendo compostos orgânicos. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes doses de superfosfato simples sobre a emergência, o crescimento inicial e a qualidade de mudas de *Hymenaea courbaril* L. produzidas em viveiro.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. ÁREA DE ESTUDO

O experimento foi conduzido no viveiro de produção de mudas e no Laboratório de Sementes Florestais (LASF) da Embrapa Amazônia Oriental, localizada em Belém, Pará (01°28' S e 48°27' W). Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Af (tropical úmido), caracterizado por temperatura média anual entre 26 e 28 °C e precipitação superiores a 3.000 mm anuais (Alvares *et al.*, 2013).

2.2. COLETA, BENEFICIAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DAS SEMENTES

Frutos maduros de *Hymenaea courbaril* L. foram coletados em novembro de 2022 de uma árvore matriz localizada na área experimental da Embrapa Amazônia Oriental (Figura 1). Após a queda natural dos frutos, procedeu-se ao beneficiamento manual para extração das sementes, seguido de lavagem em água corrente e secagem à temperatura ambiente.

O teor de umidade das sementes foi determinado de acordo com as Regras para Análise de Sementes (Brasil, 2009), obtendo-se valor médio de 13,85%.

Figura 1 - Frutos de *Hymenaea courbaril* L.



Fonte: Elizabeth Shimizu, 2023.

2.3. SUPERAÇÃO DA DORMÊNCIA E EMERGÊNCIA DAS PLÂNTULAS

Para a superação da dormência tegumentar, as sementes foram submetidas à escarificação mecânica com esmeril elétrico na região oposta ao hilo e, posteriormente, mantidas em embebição em água destilada por 48 horas. Após o tratamento pré-germinativo, as sementes foram semeadas em bandejas contendo substrato composto por areia e serragem esterilizadas na proporção de 1:1 (v/v). As bandejas permaneceram em ambiente semi-sombreado, sob irrigação diária.

Foram utilizadas quatro repetições de 25 sementes. A emergência foi monitorada diariamente para determinação da porcentagem de emergência (E%), do índice de velocidade de emergência (IVE), calculado segundo Maguire (1962), e do tempo médio de emergência (TME), determinado pela equação:

$$TME = \frac{\sum(n_i \times t_i)}{\sum n_i}$$

Em que n_i corresponde ao número de plântulas emergidas no tempo t_i .

2.4. SUBSTRATO E TRATAMENTOS

O substrato utilizado para a produção das mudas foi composto por terra preta e composto orgânico na proporção de 1:1 (v/v). O composto orgânico era proveniente da decomposição natural de resíduos de poda de árvores urbanas previamente triturados. Foram

avaliadas três doses de superfosfato simples (SFS), fertilizante contendo aproximadamente 18% de P_2O_5 solúvel em água, constituindo os seguintes tratamentos (Tabela 1):

Tabela 1 - Descrição dos tratamentos com diferentes doses de SFS aplicadas ao substrato.

Tratamento	Descrição
T1	Substrato sem adição de SFS (controle)
T2	Substrato + 800 mg L ⁻¹ de SFS
T3	Substrato + 2400 mg L ⁻¹ de SFS

Fonte: Autoria própria

2.5. PRODUÇÃO DAS MUDAS E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

As plântulas foram transplantadas para sacos plásticos com dimensões de 18 × 20 cm quando atingiram aproximadamente 16 cm de altura e apresentavam o primeiro eófilo, o que ocorreu aos 18 dias após a semeadura. Os recipientes foram preenchidos com os respectivos substratos de cada tratamento e mantidos em viveiro sob tela de sombreamento de 70%, recebendo irrigação diária durante todo o período experimental.

O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado (DIC), composto por três tratamentos e 15 repetições por tratamento, sendo cada muda considerada uma unidade experimental.

2.6. AVALIAÇÕES MORFOLÓGICAS E QUALIDADE DAS MUDAS

As avaliações foram realizadas aos 1, 30 e 60 dias após o transplante (DAT). Foram mensuradas a altura da parte aérea (H), utilizando régua graduada em centímetros, e o diâmetro do colo ($\emptyset$), determinado com paquímetro digital e expresso em milímetros.

Ao final do experimento (60 DAT), foram selecionadas dez mudas por tratamento para avaliação da biomassa. As plantas foram separadas em parte aérea e sistema radicular, secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até massa constante e pesadas para determinação da massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR) e massa seca total (MST).

A partir dessas variáveis foram calculados:

- Relação altura/diâmetro (H/ $\emptyset$);
- Relação massa seca da parte aérea/massa seca da raiz (MSPA/MSR);

- Índice de Qualidade de Dickson (IQD), calculado conforme Dickson et al. (1960):

$$IQD = \frac{MST}{(H/\phi) + (MSPA/MSR)}$$

Em que MST corresponde à massa seca total, H à altura da parte aérea, ϕ ao diâmetro do colo, MSPA à massa seca da parte aérea e MSR à massa seca da raiz.

2.7. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando constatado efeito significativo dos tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. As porcentagens de emergência foram previamente transformadas por arco seno da raiz quadrada de (x/100), visando atender aos pressupostos da análise. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software *SISVAR* (Ferreira, 2011).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. EMERGÊNCIA E DESENVOLVIMENTO INICIAL DAS PLÂNTULAS

O lote de sementes de *Hymenaea courbaril* L. apresentou 88% de emergência, com tempo médio de emergência (TME) de 12 dias e índice de velocidade de emergência (IVE) de 0,76. Aos 18 dias após a semeadura, as plântulas já haviam atingido altura média de 16 cm e apresentavam o primeiro eófilo, permitindo o transplântio para os sacos plásticos.

A elevada porcentagem de emergência confirma a eficiência da escarificação mecânica com esmeril elétrico seguida de embebição por 48 horas na superação da dormência tegumentar característica da espécie. Resultados semelhantes foram relatados para *Hymenaea courbaril*, com taxas de emergência entre 85% e 90% após escarificação mecânica, bem como para *Hymenaea parvifolia*, na qual foi observado aumento significativo da emergência quando as sementes foram submetidas à escarificação em comparação àquelas sem tratamento pré-germinativo (Lopes et al., 2006; Silva; Cesarino, 2016).

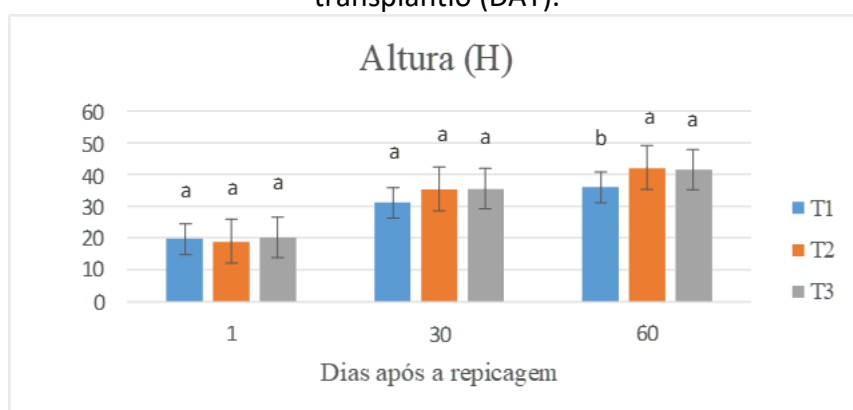
O TME de 12 dias pode ser considerado reduzido para espécies com dormência física, uma vez que valores entre 14 e 20 dias foram observados para espécies do gênero *Erythrina* na ausência de tratamentos pré-germinativos, evidenciando a importância da escarificação na aceleração e uniformização da emergência (Matheus et al., 2010). Além disso, a embebição associada ao tratamento mecânico provavelmente favorece a rápida hidratação do embrião e o início dos processos metabólicos necessários à germinação (Santos et al., 2004).

Nesse contexto, o teor de umidade das sementes (13,85%) permaneceu dentro da faixa recomendada para sementes ortodoxas armazenadas a curto prazo (10–15%), conforme as Regras para Análise de Sementes (Brasil, 2009). Esse fator, associado ao armazenamento em câmara fria, contribuiu para a manutenção da viabilidade do lote durante o período experimental.

3.2. CRESCIMENTO DAS MUDAS EM RESPOSTA À ADUBAÇÃO FOSFATADA

A altura das mudas aumentou progressivamente ao longo do período experimental, sendo observadas diferenças significativas entre os tratamentos aos 60 dias após o transplântio (Figura 2). Os tratamentos que receberam superfosfato simples (SFS) apresentaram maiores valores de altura em comparação ao controle, não havendo diferença estatística entre as doses de 800 e 2400 mg L⁻¹.

Figura 2 – Altura média (cm) de mudas de *Hymenaea courbaril* L. aos 1, 30 e 60 dias após o transplântio (DAT).



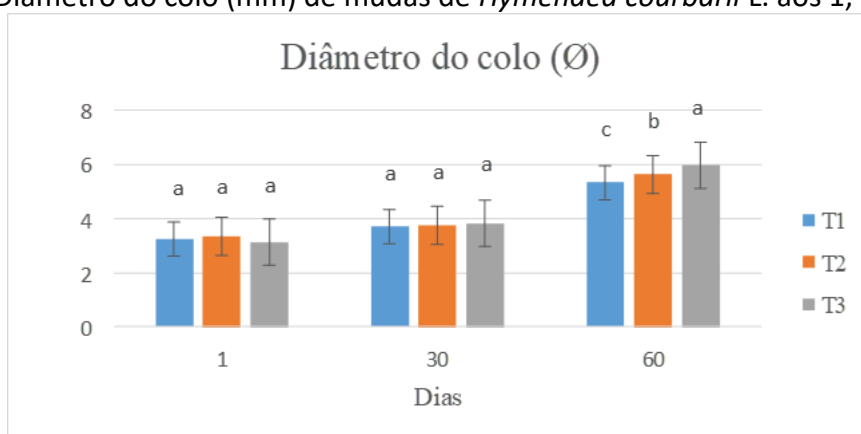
Nota: Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Aos 60 dias, os incrementos em altura foram de 14,5% e 18,4% para T2 e T3, respectivamente, em relação ao controle. Comportamento semelhante foi observado para o diâmetro do colo, que apresentou resposta positiva ao aumento da disponibilidade de fósforo no substrato (Figura 3). O tratamento T3 promoveu o maior diâmetro do colo, diferindo estatisticamente dos demais tratamentos aos 60 dias após o transplântio. O maior valor de diâmetro foi observado em T3 (5,9 mm), representando incremento de 15,7% em relação ao tratamento controle, e as mudas produzidas nos tratamentos T2 e T3 apresentaram diâmetros superiores a 5 mm, valor frequentemente associado à produção de mudas de alta qualidade para espécies florestais (Figura 3) (Pinto *et al.*, 2021).

O desempenho superior das mudas adubadas confirma a importância do fósforo para o crescimento inicial de *H. courbaril*. Esse nutriente participa diretamente do metabolismo energético, da síntese de ácidos nucleicos e dos processos de divisão e expansão celular, desempenhando papel fundamental no estabelecimento e desenvolvimento inicial das plantas (Taiz; Zeiger, 2006). Resultados semelhantes foram observados em mudas de *Erythrina velutina*, nas quais o aumento das doses de fósforo promoveu crescimento linear em altura e diâmetro do colo, bem como em mudas de *Hymenaea stigonocarpa* cultivadas em substratos mais férteis, evidenciando a importância da disponibilidade nutricional para o desenvolvimento de espécies do gênero (Leite *et al.*, 2014; Costa *et al.*, 2011).

Quando comparados a outros estudos com mudas de jatobá (*Hymenaea courbaril*), os valores obtidos neste estudo podem ser considerados elevados, uma vez que foram registradas alturas médias inferiores em diferentes condições de substrato e sombreamento, além de variações entre 25 e 30 cm aos 60 dias em mudas cultivadas em substratos de baixo custo, evidenciando o efeito positivo da adubação com SFS no crescimento das plantas (Guidino *et al.*, 2021; Silva, 2017). Além do crescimento em altura, o incremento do diâmetro do colo possui relevância prática para programas de restauração ecológica, sendo este um parâmetro amplamente utilizado como indicador da robustez das mudas, estando associado à maior capacidade de sobrevivência após o plantio em campo (Gomes *et al.*, 2002; Cruz *et al.*, 2004).

Figura 3 – Diâmetro do colo (mm) de mudas de *Hymenaea courbaril* L. aos 1, 30 e 60 DAT.



Nota: Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Outro aspecto importante refere-se ao tempo de permanência das mudas no viveiro. Os tratamentos adubados ultrapassaram 30 cm de altura aos 60 dias, patamar

frequentemente recomendado para expedição e plantio em campo de espécies florestais nativas (Cruz *et al.*, 2004; Lima *et al.*, 2008). Dessa forma, a utilização de superfosfato simples pode contribuir para reduzir o período de produção das mudas, aumentando a eficiência operacional dos viveiros.

3.3. QUALIDADE DAS MUDAS E ALOCAÇÃO DE BIOMASSA

Embora os maiores valores numéricos de massa seca total e IQD tenham sido observados em T3, não foram detectadas diferenças estatísticas entre os tratamentos para nenhuma das variáveis avaliadas (Tabela 2). A ausência de diferenças significativas pode ser explicada, em parte, pela elevada variabilidade observada entre as mudas, evidenciada pelos coeficientes de variação relativamente altos, especialmente para massa seca total. Essa condição é comum em experimentos com espécies florestais nativas, que frequentemente apresentam ampla variabilidade individual durante as fases iniciais de crescimento (Honorio *et al.*, 2019).

Outro fator que pode ter contribuído para esse resultado é o curto período experimental. Embora o fósforo tenha promovido aumentos significativos em altura e diâmetro, o acúmulo de biomassa total geralmente ocorre de forma mais gradual, tornando-se mais evidente em períodos mais longos de cultivo (Silva *et al.*, 2018; Tang *et al.*, 2024). Assim, avaliações realizadas aos 90 ou 120 dias poderiam evidenciar diferenças mais pronunciadas entre os tratamentos. Apesar da ausência de significância estatística, os valores obtidos para o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) indicam elevada qualidade das mudas produzidas, considerando que valores superiores a 0,20 são classificados como satisfatórios e aqueles acima de 0,30 são recomendados para espécies florestais nativas; nesse contexto, todos os tratamentos apresentaram IQD superior a esse limite, com destaque para T3, que atingiu 0,40 (Dickson *et al.*, 1960; Fonseca *et al.*, 2002).

As relações $H/\varnothing$ variaram entre 7,07 e 7,59, situando-se dentro da faixa considerada adequada para mudas florestais (Tabela 2) (Gomes *et al.*, 2002). Esses resultados indicam equilíbrio entre crescimento em altura e espessamento do caule, sem evidências de estiolamento ou desenvolvimento excessivamente compacto. De forma semelhante, os valores de MSPA/MSR permaneceram entre 3,11 e 3,55, indicando distribuição equilibrada da biomassa entre parte aérea e sistema radicular, uma vez que esse equilíbrio é desejável em

mudas destinadas ao plantio em campo, pois favorece simultaneamente a capacidade fotossintética e a absorção de água e nutrientes (Tabela 2) (Carneiro, 1983).

Tabela 2 – Relações morfológicas (H/Ø e MSPA/MSR), massa seca total (MST) e Índice de Qualidade de Dickson (IQD) de mudas de *Hymenaea courbaril* L. aos 60 dias após o transplante (DAT).

Tratamento	H/Ø	MSPA/MSR	MST (g)	IQD
T1 (controle)	7,07 a	3,14 a	3,686 a	0,366 a
T2 (800 mg L ⁻¹)	7,59 a	3,55 a	3,911 a	0,357 a
T3 (2400 mg L ⁻¹)	7,34 a	3,11 a	4,183 a	0,404 a
CV (%)	13,62	10,93	34,01	18,71

Nota: Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Por fim, destaca-se que a maior dose de superfosfato simples não provocou efeitos negativos sobre os indicadores morfológicos de qualidade. Pelo contrário, apresentou os maiores valores numéricos de massa seca total e IQD, sugerindo que *H. courbaril* tolera adequadamente a dose de 2400 mg L⁻¹ de SFS durante a fase de viveiro, com potencial para produzir mudas mais vigorosas e aptas ao estabelecimento em campo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A escarificação mecânica seguida de embebição em água por 48 horas foi eficiente para promover a emergência de sementes de *Hymenaea courbaril* L., possibilitando a obtenção de plântulas uniformes para produção de mudas em viveiro. A adição de superfosfato simples ao substrato favoreceu o crescimento inicial das mudas, promovendo incrementos importantes em altura e diâmetro do colo aos 60 dias após o transplante. Os tratamentos com adubação fosfatada apresentaram desempenho superior ao controle, evidenciando a importância do fósforo para o desenvolvimento inicial da espécie. Embora não tenham sido observadas diferenças significativas para os índices de qualidade e variáveis de biomassa, todas as mudas apresentaram padrões morfológicos adequados para produção em viveiro. Assim, a utilização de superfosfato simples mostra-se uma alternativa promissora para

a produção sustentável de mudas de *H. courbaril*, contribuindo para programas de restauração ecológica e recuperação de áreas degradadas.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Sementes Florestais da Embrapa, pelo suporte técnico e científico durante a execução do estudo.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- AMORIN, R. dos S.; FALLER, B. V.; OLIVEIRA, I. A. de; JARDIM, I. N. Root pruning and Osmocote® provide better jatoba seedlings. **Científica**, v. 48, n. 1, p. 49–55, 2020. DOI: 10.15361/1984-5529.2020v48n1p49-55.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para Análise de Sementes**. Brasília: MAPA/ACS, Secretaria de Defesa Agropecuária, 2009. 395p. Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/2946_regras_analise_sementes.pdf. Acesso em 01 mar. 2024.
- CARNEIRO, J. G. de A. Variações na metodologia de produção de mudas florestais afetam os parâmetros morfofisiológicos que indicam a sua qualidade. Curitiba: FUPEF, 1983. (Série Técnica, n. 12), p. 1–40.
- CARVALHO, P. E. R. Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira. Brasília: **EMBRAPA/CNPQ**, 1994. 640p.
- CARVALHO, P. R. M.; SILVA, C. A. da; REIS, L. L. dos; MAFFUD, J. R. Superação de dormência de sementes e desenvolvimento de mudas de jatobazeiro em substratos alternativos. **Colloquium Agrariae**, v. 16, n. 5, p. 103–113, 2020.
- COSTA, W.; SOUZA, A.; SOUZA, P. Ecologia, manejo, silvicultura e tecnologia de espécies nativas da mata atlântica. **Espécies Nativas da Mata Atlântica**, n. 2, 2011.
- CRUZ, C. A. F.; PAIVA, H. N.; GOMES, K. C. O.; GUERRERO, C. R. A. Efeito de diferentes níveis de saturação por bases no desenvolvimento e qualidade de mudas de ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* Mart. Standley). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 66, p. 100 - 107, 2004.
- DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **Forestry Chronicle**, Ontário, v. 36, n. 1, p. 10-13, 1960. dormência em sementes de duas espécies de *Erythrina*. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 3, p.48-53, 2010.

- FERNANDES, J. M. JATOBÁ (*Hymenaea courbaril* L. LEGUMINOSAE, CAESALPINIOIDEAE): uso MEDICINAL, CULTIVO E CONTRIBUIÇÕES PARA A ESPÉCIE. **Revista Educação Ambiental**, v. 5, n. 18, p.1-8, 2006.
- FERREIRA, D.F. Sisvar: A computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.35, n.6, p.1039-1042, 2011.
- FONSECA, E. P.; VALÉRIO, S. V.; MIGLIORANZA, E.; FONSECA, N. A. N.; COUTO, L. Padrão de qualidade de mudas de *Trema micrantha* (L.) Blume, produzidas sob diferentes períodos de sombreamento. **Revista Árvore**, v. 26, p. 515–523, 2002.
- GOMES, J. M.; COUTO, L.; LEITE, H. G.; XAVIER, A.; GARCIA, S. L. R. Parâmetros morfológicos na avaliação da qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v. 26, p. 655–664, 2002.
- GUIDINO, D. R., DA ROCHA, I. F., DOS REIS, R. L. M., DE SOUZA, S. A. AVALIAÇÃO DE DIFERENTES SUBSTRATOS NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE JATOBÁ (*Hymenaea coubaril*). Instituição de Ensino Superior no Intumbiara, Goiás, 2021.
- HONORIO, A. B. M.; LOPES, M. B. S; SIEBENEICHLER, S. C.; SOUZA, C. M; LEAL, T.C. A. de B.; Análise de crescimento e parâmetros fisiológicos em mudas de *Dipteryx alata* Vogel. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava-PR, v.12, n.1, p.41-52, Jan-Abr., 2019. DOI: 10.5935/PAeT.V12.N1.04.
- LAPOLA, D., et al. Os fatores e impactos da degradação da floresta amazônica. **Science**, vol. 379, n. 6630, 2023. <https://doi.org/10.1126/science.abp8622>
- LCOSSELLI, G. M.; KROTTENTHALER, S.; PITSCH, P.; ANHUF, D.; CECCANTINI, G. Idade e taxa de crescimento de espécies arbóreas congenéricas (*Hymenaea* spp. – Leguminosae) que habitam diferentes biomas tropicais. **Erdkunde**, v. 71, n. 1, p. 45–57, 2017. DOI: 10.3112/erdkunde.2017.01.03.
- LEITE, T.S.; FREITAS, R.M.O.; DOMBROSKI, J.L.D. et al. Crescimento e partição da biomassa de mudas de mulungu sob adubação fosfatada e inoculação micorrízica. **Pesquisa Florestal Brasileira** v.34, n.80, p.407-415, 2014.
- LIMA, J. D.; SILVA, B. M. S.; MORAES, W. S.; DANTAS, V. A. V.; ALMEIDA, C. C. Efeitos da luminosidade no crescimento de mudas de *Caesalpinia ferrea* Mart. ex Tul. (Leguminosae, Caesalpinoideae). **Acta Amazonica**, Manaus, v. 38, p. 5 - 10, 2008.
- LOPES, J. C.; DIAS, P. C.; MACEDO, C. M. P. Tratamentos para acelerar a germinação e reduzir a deterioração das sementes de *Ormosia nitida* Vog. **Revista Árvore**, v. 30, n. 2, p. 171-177, 2006.

- MATHEUS, M.T.; GUIMARÃES, R.M.; BACELAR, M.; OLIVEIRA, S.A.S. Superação de dormência em sementes de duas espécies de *Erythrina*. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 3, p.48-53, 2010.
- PINTO, R.B.; TOZZI, A.M.G.A.; MANSANO, V.F. 2020. *Hymenaea* in **Flora e Funga do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Available at:<<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB22972>>. Acesso em 01 mar. 2024.
- PINTO, V. V. F.; BUENO, M. M.; ANTUNES, L. F. de S.; ALONSO, J. M.; ABAURRE, G. W. Crescimento de mudas de *Poincianella pluviosa* (DC.) L. P. Queiroz em diferentes substratos e lâminas de superfície. **Madera y Bosques**, v. 27, 2021. DOI: 10.21829/myb.2021.2712173.
- PRADO, R. M.; VALE, D. W.; ROMUALDO, L. M. Fósforo na nutrição e produção de mudas de maracujazeiro. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 27, n. 03, p. 493-498, 2005.
- SANTOS, T. O.; MORAIS, T. G. de O.; MATOS, V. P. Escarificação mecânica em sementes de *Sterculia foetida* L. **Revista Árvore**, v. 28, p. 1–6, 2004. DOI: 10.1590/S0100-67622004000100001.
- SCHULZE, M.; SHANLEY, P. Árvores e Cipós. In: SHANLEY, P.; MEDINA, G. Frutíferas e Plantas Úteis na Vida Amazônica. 1. ed. Belém: Cifor & Imazon, 2010. p. 41-147. Disponível em: https://www.cifor.org/publications/pdf_files/Books/BShanley0501.pdf. Acesso em 01 mar. 2024.
- SILVA, B. M. S.; CESARINO, F.. Germinação de sementes e emergência de plântulas de jutaí (*Hymenaea parvifolia* Huber.). **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v. 18, n. 1, p. 256–263, 2016.
- SILVA, E. N. da; TAVARES, A. T.; SILVA, C. P. da; FERREIRA, T. A.; CARLINE, J. V. G.; NASCIMENTO, I. R. Fungos micorrízicos arbusculares e doses de fósforo no desenvolvimento de mudas de guanandi. **Nativa**, v. 6, n. 3, p. 246–251, 2018. DOI: 10.31413/nativa.v6i3.4720.
- SILVA, L. L; Substratos para a produção de mudas de jatobá (*Hymenaea courbaril* L.). 2017. 33f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Sementes) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2017.
- SOUZA, L. A; LIMA R. M. B; Métodos para produção de mudas de jatobá (*Hymenaea courbaril* L.) e colubrina (*Colubrina glandulosa* Perk) em condições de viveiro na Amazônia; In: REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 64, Resumos. São Luis, 2012, 323 p. Superação Dormência, IPEF 1997. Disponível em: <https://www.ipef.br/tecsementes/dormencia.asp>. Acesso em 02 mar. 2024.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. Porto Alegre: Artmed, 2006. 719 p.

- TANG, G.; WANG, Y.; LU, Z.; CHENG, S.; HU, Z.; CHEN, S.; CHEN, L.; TANG, J.; XU, Y.; CAI, N. Efeitos da combinação de nitrogênio e fósforo na acumulação de biomassa, alocação e relações de crescimento alométrico em mudas de *Pinus yunnanensis* após poda apical. **Plants**, v. 13, n. 17, p. 2450, 2024. DOI: 10.3390/plants13172450.
- VIEIRA, C. R.; WEBER, O. L. dos S.; SCARAMUZZA, J. F. Efeitos da saturação por bases no crescimento e na nutrição de mudas de jatobá. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 9, n. 1, 2015. DOI: 10.18316/1981-8858.15.1.
- ZAIA, F. C.; GAMA-RODRIGUES, A. C. da; GAMA-RODRIGUES, E. F. da. Formas de fósforo no solo sob leguminosas florestais, floresta secundária e pastagem no norte fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1191–1197, 2008.

CAPÍTULO XVII

MECANISMOS DE TOXICIDADE DO CÁDMIO EM ESPÉCIES VEGETAIS E O PAPEL DO 5-ALA: UMA REVISÃO DE LITERATURA

CADMIUM TOXICITY MECHANISMS IN PLANT SPECIES AND THE ROLE OF 5-ALA: A LITERATURE REVIEW

DOI: 10.51859/amplla.mac6200-17

Vitoria Luiza dos Passos¹

Paula Daniele Martins Moraes²

Marcele Farias Pereira³

Hanna Ferreira de Souza¹

Ricardo Christin Lobato Machado²

Cândido Ferreira de Oliveira Neto⁴

¹ Mestranda em Ciências Florestais. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais – UFRA

² Doutorando (a) em Ciências Florestais. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais – UFRA

³ Mestre em Ciências Florestais. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais – UFRA

⁴ Professor Adjunto. Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

RESUMO

Embora alguns metais pesados desempenhem funções essenciais para a flora quando presentes em baixas concentrações, as atividades antrópicas têm promovido o acúmulo de elementos potencialmente tóxicos no ambiente, representando uma ameaça significativa à biota e à segurança alimentar. Entre esses contaminantes, destaca-se o cádmio (Cd), um dos metais pesados de maior preocupação devido à sua elevada toxicidade, persistência ambiental e capacidade de bioacumulação. Nesse cenário, o ácido 5-aminolevulínico (5-ALA) tem se destacado como um regulador de crescimento vegetal promissor, uma vez que sua aplicação em plantas submetidas ao estresse por Cd tem promovido melhorias na atividade fotossintética, na absorção de nutrientes e na capacidade antioxidante. Sendo assim, o objetivo desta revisão é compilar informações sobre os impactos e formas de combate do estresse por cádmio nas plantas. Diferentemente de micronutrientes, o Cd não desempenha qualquer função biológica conhecida nas plantas e pode ser facilmente absorvido pelas raízes, acumulando-se nos tecidos vegetais. A exposição a concentrações elevadas desse elemento desencadeia uma série de alterações fisiológicas, bioquímicas e morfológicas, comprometendo significativamente o

desenvolvimento de espécies vegetais. Conclui-se que a contaminação por cádmio (Cd) resulta em danos ao metabolismo vegetal, dada a elevada fitotoxicidade do metal. Por sua vez, o ácido 5-aminolevulínico (5-ALA) consolida-se como uma estratégia promissora para atenuar os efeitos desse metal pesado, favorecendo mecanismos fisiológicos e bioquímicos relacionados à tolerância ao estresse.

Palavras-chave: Toxicidade. Tolerância. Metais pesados.

ABSTRACT

Although some heavy metals play essential roles in plant life when present in low concentrations, anthropogenic activities have promoted the accumulation of potentially toxic elements in the environment, representing a significant threat to biota and food security. Among these contaminants, cadmium (Cd) stands out as one of the most concerning heavy metals due to its high toxicity, environmental persistence, and bioaccumulation capacity. In this scenario, 5-aminolevulinic acid (5-ALA) has emerged as a promising plant growth regulator, since its application in plants subjected to Cd stress has promoted improvements in photosynthetic activity, nutrient absorption, and antioxidant capacity.



Therefore, the objective of this review is to compile information on the impacts and ways to combat cadmium stress in plants. Unlike micronutrients, Cd does not perform any known biological function in plants and can be easily absorbed by the roots, accumulating in plant tissues. Exposure to high concentrations of this element triggers a series of physiological, biochemical, and morphological changes, significantly compromising the development of plant species. It is concluded that

cadmium (Cd) contamination results in damage to plant metabolism, given the metal's high phytotoxicity. In turn, 5-aminolevulinic acid (5-ALA) is emerging as a promising strategy to mitigate the effects of this heavy metal, favoring physiological and biochemical mechanisms related to stress tolerance.

Keywords: Toxicity. Tolerance. Heavy metals.

1. INTRODUÇÃO

A contaminação ambiental por metais pesados tem se consolidado como uma das principais preocupações associadas à degradação dos ecossistemas e à sustentabilidade da produção agrícola (Alengebawy *et al.*, 2021; Shaari *et al.*, 2022). Embora alguns metais sejam essenciais ao metabolismo vegetal em baixas concentrações, atividades antrópicas têm intensificado o acúmulo de elementos altamente tóxicos, tornando-se uma ameaça direta à biota e à segurança alimentar (Kumar *et al.*, 2019; Shaari *et al.*, 2022).

Dentre os metais potencialmente tóxicos presentes em áreas agrícolas, o cádmio (Cd) destaca-se como um dos poluentes de maior alerta devido à sua persistência e elevada mobilidade no sistema solo-planta (Shaari *et al.*, 2022; Kumar *et al.*, 2019). Diferentemente de micronutrientes, o Cd não possui função biológica conhecida para as plantas, sendo facilmente absorvido pelas raízes (Shaari *et al.*, 2022). Sua permanência no ambiente favorece a bioacumulação nos tecidos vegetais e a transferência trófica, podendo contribuir para biomagnificação em determinados contextos ecológicos e para riscos à cadeia alimentar (Ali; Khan, 2019; Saidon *et al.*, 2024). No metabolismo vegetal, a presença desse metal induz severos danos fisiológicos e estresse oxidativo, comprometendo processos vitais e resultando em expressivas reduções na produção de biomassa (Shaari *et al.*, 2022).

Diante da gravidade dos impactos causados pelo cádmio sobre o desempenho das culturas, torna-se essencial o desenvolvimento de estratégias capazes de aumentar a tolerância das plantas a esse estresse abiótico (Ali *et al.*, 2015; Hu *et al.*, 2025). Nesse contexto, a aplicação de substâncias bioestimulantes tem se mostrado uma alternativa viável para o manejo agrícola em áreas contaminadas, especialmente quando atuam na manutenção da fotossíntese, no equilíbrio nutricional e no sistema antioxidante (Xu *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2019). O ácido 5-aminolevulinico (5-ALA) surge como um regulador promissor, visto que sua aplicação exógena em plantas sob estresse por Cd tem sido associada à melhoria do

crescimento, da capacidade fotossintética, da estrutura celular, da absorção de nutrientes e à redução do estresse oxidativo (Ali *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2016; Ali *et al.*, 2015; Hu *et al.*, 2025).

Dessa forma, compreender o papel do 5-ALA na mitigação da toxicidade por cádmio é fundamental para ampliar o conhecimento sobre mecanismos de tolerância vegetal e subsidiar alternativas tecnológicas de cultivo em ambientes contaminados (Ali *et al.*, 2013). Neste sentido, este capítulo tem como objetivo revisar os principais impactos do cádmio sobre as plantas e discutir o potencial do ácido 5-aminolevulínico como estratégia mitigadora dos danos provocados por esse metal pesado.

2. METAIS PESADOS MEIO AMBIENTE

Os metais pesados são definidos como elementos químicos que apresentam densidade superior a 5 g cm^{-3} e estima-se a ocorrência de aproximadamente 53 elementos pertencentes a esse grupo, dos quais cerca de 17 encontram-se biodisponíveis para os ecossistemas e organismos vivos devido a sua solubilidade em condições fisiológicas (Viera *et al.*, 2015). Ocorrem naturalmente no ambiente em decorrência de processos geológicos, uma vez que os mesmos são liberados durante os processos de intemperismo, dissolução e lixiviação das rochas, de forma que os solos constituem uma das principais reservas naturais de metais pesados (Viera *et al.*, 2015). Além das fontes naturais, diferentes atividades antrópicas contribuem para o acúmulo desses contaminantes nos solos e recursos hídricos, incluindo a utilização de águas de irrigação contaminadas, a deposição atmosférica, a aplicação excessiva de fertilizantes e defensivos agrícolas, bem como a disposição inadequada de resíduos industriais e urbanos (Meurer, 2006).

Alguns desses elementos desempenham funções fundamentais no metabolismo vegetal, atuando como micronutrientes indispensáveis ao crescimento e desenvolvimento das plantas, como o molibdênio (Mo), cobre (Cu), ferro (Fe), zinco (Zn), níquel (Ni) e manganês (Mn). Outros, como cromo (Cr), vanádio (V) e cobalto (Co), embora não sejam considerados essenciais para a maioria das espécies vegetais, podem exercer funções benéficas em condições específicas (Swain, 2024). Em contrapartida o cádmio (Cd), chumbo (Pb), urânio (U) e mercúrio (Hg), estão no grupo de metais que não possuem função biológica conhecida para as plantas e podem apresentar elevada toxicidade mesmo em baixas concentrações (Vieira *et al.*, 2015).

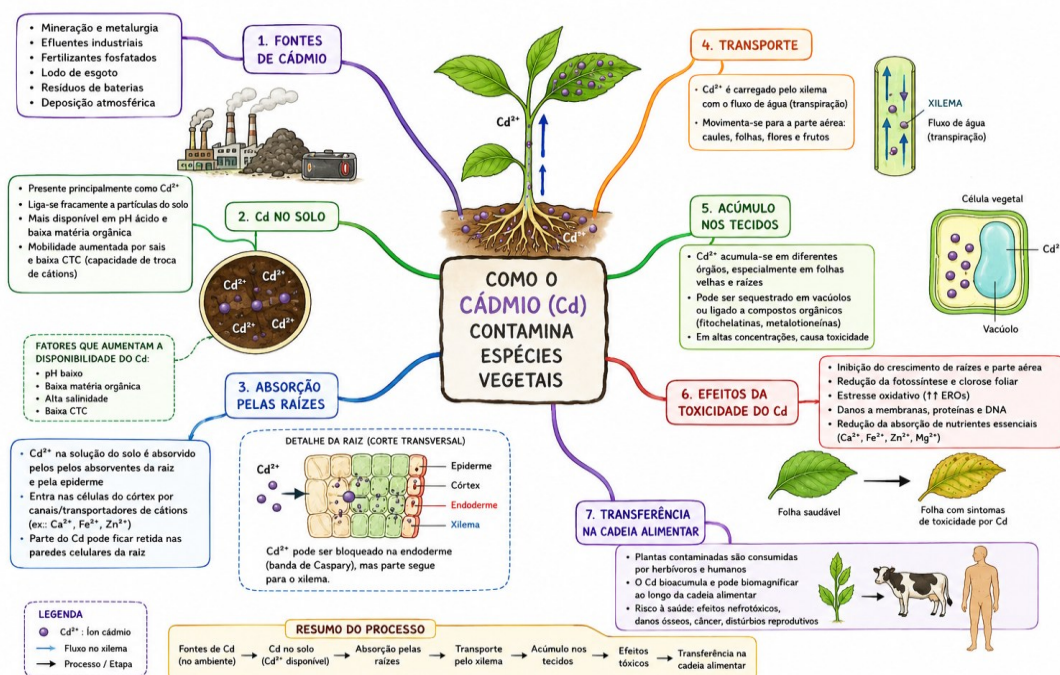
Uma característica preocupante dos metais pesados é sua elevada persistência ambiental, uma vez que podem permanecer por longos períodos em ambientes aquáticos, acumulando-se em organismos aquáticos, vegetação associada e em sedimentos que ficam no fundo ou em suspensão (Adnan *et al.*, 2024). Em consequência, a depender do tipo de contaminação, os metais pesados fitotóxicos presentes em ambientes contaminados, podem causar efeitos tóxicos significativos sobre a fauna e a flora, que absorveram ou acumularam estes metais (Hall, 2002; Pandey; Sharma, 2005) comprometendo a biodiversidade e o funcionamento dos ecossistemas (Mishra; Tripathi, 2008).

3. CÁDMIO

O cádmio (Cd) é um metal pesado com densidade aproximada de $8,6 \text{ g cm}^{-3}$, considerado relativamente raro na natureza por não ocorrer, em geral, em sua forma elementar pura (Souza *et al.*, 2009). Esse elemento encontra-se frequentemente de forma impura em minérios de zinco e pode acumular-se em solos e sedimentos aquáticos, facilitando sua disponibilidade e absorção pelo sistema radicular das plantas (Vecchia *et al.*, 2005). Sua presença no ambiente é observada em áreas naturais, regiões agrícolas e de mineração, especialmente em locais submetidos à aplicação de fertilizantes e herbicidas que apresentam o cádmio como contaminante em sua composição (Shah *et al.*, 2001; Pereira *et al.*, 2002). Além de sua ocorrência natural, o cádmio possui ampla aplicação industrial, sendo utilizado na fabricação de diversos produtos, como baterias, lâmpadas, pigmentos, tintas, plásticos, vidros e derivados do carvão mineral (figura 1) (Vieira *et al.*, 2015).

O descarte inadequado e em grandes quantidades desses materiais constitui uma importante fonte de contaminação ambiental, contribuindo para o aumento das concentrações desse metal nos ecossistemas. Devido à sua capacidade de permanência no ambiente e potencial de bioacumulação, o cádmio pode ser absorvido e armazenado nos tecidos vegetais, tornando-se passível de transferência ao longo da cadeia alimentar (Wancura; Milanesi; Cargnelutti, 2025). Esse processo representa um risco para animais e seres humanos, uma vez que favorece a biomagnificação do contaminante e amplia seus impactos sobre a saúde e o ambiente (Vecchia *et al.*, 2005).

Figura 1 – Contaminação do cádmio no ambiente.



Fonte: Autoria própria.

3.1. TOXIDEX DO CÁDMIO NAS PLANTAS

O cádmio (Cd) é considerado um dos metais pesados mais tóxicos para as plantas, não desempenhando qualquer função essencial em seu metabolismo (Shah *et al.*, 2001; Vitória *et al.*, 2001; Pereira *et al.*, 2002). A exposição a concentrações elevadas desse elemento provoca uma série de alterações fisiológicas, bioquímicas e morfológicas, comprometendo significativamente o crescimento e o desenvolvimento vegetal (Oliveira *et al.*, 2001). Entre os principais efeitos observados estão a redução da absorção e do acúmulo de nutrientes pelo sistema radicular, decorrente da diminuição da atividade metabólica das plantas (Andrade *et al.*, 2005). A toxicidade por cádmio afeta diretamente processos fundamentais, como a fotossíntese e a transpiração, promovendo a redução da produção de fotoassimilados e comprometendo o balanço hídrico da planta. Além disso, acelera a senescência foliar, intensifica os sintomas de clorose, aumenta a taxa respiratória e reduz o acúmulo de matéria seca, resultando em menor crescimento tanto das raízes quanto da parte aérea (Schützendübel *et al.*, 2001; Soltan; Rashed, 2003; Vecchia *et al.*, 2005). O metal também interfere indiretamente no fechamento estomático e promove danos às membranas celulares, comprometendo sua integridade estrutural (Fornazier *et al.*, 2002; Andrade *et al.*, 2005). No aparato fotossintético, o Cd provoca alterações na síntese e na fluorescência da

clorofila, modifica a concentração e a composição dos pigmentos fotossintéticos e inibe a atividade do fotossistema II, reduzindo a eficiência da conversão de energia luminosa em energia química (Vieira *et al.*, 2015). Essas alterações favorecem desvios na cadeia transportadora de elétrons e aumentam a formação de espécies reativas de oxigênio, contribuindo para o estresse oxidativo celular (Vieira *et al.*, 2015).

Além disso, o cádmio interfere nos sistemas antioxidantes das plantas, promovendo o acúmulo de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e aumentando os danos oxidativos, o que pode resultar na morte celular (Schützendübel *et al.*, 2001). Sua elevada afinidade por grupos funcionais presentes em compostos orgânicos, especialmente proteínas, favorece a formação de complexos que comprometem a atividade de diversas enzimas-chave essenciais ao metabolismo vegetal (Metwally *et al.*, 2003). Como consequência, são observadas alterações em importantes rotas metabólicas, incluindo o Ciclo de Calvin, o metabolismo dos carboidratos, a assimilação de sulfato e a organização estrutural dos tilacoides (Shah *et al.*, 2001; Fornazier *et al.*, 2002; Cardoso *et al.*, 2002; Pereira *et al.*, 2002). De modo geral, a exposição ao cádmio resulta em redução do crescimento vegetal e da produção de biomassa, sendo as raízes frequentemente os órgãos mais afetados em razão da limitação na absorção de nutrientes minerais (Shah *et al.*, 2001; Vitória *et al.*, 2001; Fornazier *et al.*, 2002; Soltan; Rashed, 2003; Benavides *et al.*, 2005). Como mecanismo de defesa, algumas espécies promovem a lignificação do ápice radicular, restringindo a entrada do metal nos tecidos. Contudo, essa resposta também reduz a capacidade de absorção de água e nutrientes, comprometendo ainda mais o crescimento e o desenvolvimento das plantas (Schützendübel; Polle, 2002).

4. ÁCIDO 5-AMINOLEVULÍNICO

O ácido 5-aminolevulínico (5-ALA) é um aminoácido não proteico amplamente distribuído em diferentes grupos de organismos e reconhecido por seu papel central no metabolismo vegetal. Sua biossíntese ocorre por duas vias distintas: a via C₅, predominante em plantas, algas, cianobactérias e na maioria das bactérias e arqueias, utilizando o glutamato como precursor; e a via C₄, presente em animais, leveduras e algumas bactérias, que utiliza glicina e succinil-coenzima A como substratos (Kaya *et al.*, 2023). Do ponto de vista fisiológico, o 5-ALA constitui um precursor essencial na biossíntese de tetrapirróis, incluindo a clorofila e o grupo heme, moléculas fundamentais para a fotossíntese, respiração celular e diversos

processos metabólicos das plantas (Li *et al.*, 2022). Em razão dessas funções, o composto tem despertado crescente interesse como regulador vegetal e agente mitigador de estresses abióticos. Diversos estudos demonstram que a aplicação exógena de 5-ALA aumenta a capacidade das plantas de tolerar condições ambientais adversas, promovendo ajustes fisiológicos e bioquímicos que favorecem a manutenção do crescimento e da produtividade. Entre os efeitos observados destacam-se o aumento da taxa fotossintética, a melhoria da eficiência do uso da luz, a maior assimilação de carbono e nitrogênio e a ativação de mecanismos antioxidantes (Watanabe *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2004; Maruyama-Nakashita *et al.*, 2010).

A importância do 5-ALA torna-se ainda mais evidente em condições de contaminação por metais pesados, e nessas condições, a aplicação do composto tem se mostrado eficaz na mitigação dos danos causados pelo estresse oxidativo induzido pelos metais (Tan *et al.*, 2022). Estudos relatam que o 5-ALA promove o aumento da atividade de enzimas antioxidantes, reduz o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs) e de malondialdeído (MDA), além de contribuir para a recuperação de estruturas celulares e organelas afetadas pela toxicidade metálica (Li *et al.*, 2022). Além disso, o 5-ALA atua na regulação de mecanismos moleculares e fisiológicos relacionados à tolerância ao estresse, fortalecendo os sistemas de defesa das plantas e reduzindo os efeitos negativos provocados pela exposição a contaminantes ambientais (Kaya *et al.*, 2023). Dessa forma, sua aplicação exógena tem sido considerada uma estratégia promissora para minimizar os impactos da contaminação por metais pesados, contribuindo para a manutenção do metabolismo vegetal, da integridade celular e do desempenho produtivo das plantas sob condições de estresse (Tan *et al.*, 2022). Em conjunto, as evidências disponíveis indicam que o ácido 5-aminolevulínico desempenha papel relevante na atenuação dos efeitos tóxicos causados por metais pesados, configurando-se como uma ferramenta potencial para o manejo de plantas cultivadas em ambientes sujeitos à contaminação por esses elementos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A contaminação dos ecossistemas por cádmio (Cd) representa um desafio crítico para a segurança alimentar e a sustentabilidade da produção agrícola, dada a elevada fitotoxicidade do metal e sua forte capacidade de bioacumulação na cadeia trófica. Como demonstrado, a ausência de função biológica do Cd para o metabolismo vegetal resulta em

danos sistêmicos, que vão desde a inibição da absorção de nutrientes até a severa degradação do aparato fotossintético e a indução de intenso estresse oxidativo. Frente a esse cenário de toxidez, a aplicação exógena do ácido 5-aminolevulínico (5-ALA) consolida-se como uma estratégia biotecnológica e agronômica altamente promissora. Ao estabilizar a fisiologia da planta, o 5-ALA confere a resiliência necessária para a manutenção do crescimento vegetal mesmo sob forte pressão metálica. Embora os mecanismos fisiológicos e bioquímicos mediados pelo 5-ALA em condições controladas estejam cada vez mais elucidados na literatura, é imperativo que pesquisas futuras avancem para a validação dessas respostas em condições reais de campo. Além disso, estudos focados na viabilidade econômica da aplicação em larga escala e na sinalização molecular em diferentes espécies florestais e culturas de interesse econômico são necessários. Tais avanços permitirão consolidar o uso do 5-ALA não apenas como um fenômeno laboratorial, mas como uma ferramenta prática e indispensável para o manejo agrícola e a fitorremediação de áreas degradadas por metais pesados.

REFERÊNCIAS

- ADNAN, M. et al. Heavy metals pollution from smelting activities: a threat to soil and groundwater. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 274, art. 116189, p. 1-12, 2024.
- ALENGEBAWY, A.; ABDELKHALEK, S. T.; QURESHI, S. R.; WANG, M. Q. Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: ecological risks and human health implications. **Toxics**, v. 9, n. 3, art. 42, 2021.
- ALI, B.; TAO, Q.; ZHOU, Y.; GILL, R. A.; ALI, S.; RAFIQ, M. T.; XU, L.; ZHOU, W. 5-Aminolevulinic acid mitigates the cadmium-induced changes in *Brassica napus* as revealed by the biochemical and ultra-structural evaluation of roots. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 92, p. 271-280, 2013.
- ALI, B.; WANG, B.; ALI, S.; GHANI, M. A.; HAYAT, M. T.; YANG, C.; XU, L.; ZHOU, W. J. 5-Aminolevulinic acid ameliorates the growth, photosynthetic gas exchange capacity, and ultrastructural changes under cadmium stress in *Brassica napus* L. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 32, p. 604-614, 2013.
- ALI, H.; KHAN, E.; ILAHI, I. Trophic transfer, bioaccumulation, and biomagnification of non-essential hazardous heavy metals and metalloids in food chains/webs: concepts and implications for wildlife and human health. **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, v. 25, n. 6, p. 1353-1376, 2019.
- ANDRADE, S. A. L.; JORGE, R. A.; SILVEIRA, A. P. D. Cadmium effect on the association of jackbean (*Canavalia ensiformis*) and arbuscular mycorrhizal fungi. **Scientia Agricola**, v. 62, n. 4, p. 389-394, 2005.

- BENAVIDES, M. P.; GALLEGOS, S. M.; TOMARO, M. L. Cadmium toxicity. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, p. 21-34, 2005.
- CARDOSO, P. F.; MOLINA, S. M. G.; PEREIRA, G. J. G.; VITÓRIA, A. P.; AZEVEDO, R. A. Response of rice inbred lines to cadmium exposure. **Journal of Plant Nutrition**, v. 25, p. 927-944, 2002.
- FORNAZIER, R. F.; FERREIRA, R. R.; VITÓRIA, A. P.; MOLINA, S. M. G.; LEA, P. J. Effects of cadmium on antioxidant enzymes activities in sugar cane. **Biologia Plantarum**, v. 45, p. 91-97, 2002.
- HALL, J. L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, p. 1-11, 2002.
- HU, Y.; HE, R.; MU, X.; ZHOU, Y.; LI, X.; WANG, H.; XING, W.; LIU, D. Cadmium toxicity in plants: from transport to tolerance mechanisms. **Plant Signaling & Behavior**, v. 20, n. 1, art. 2544316, 2025.
- KAYA, C. et al. 5-Aminolevulinic acid induces chromium [Cr(VI)] tolerance in tomatoes by alleviating oxidative damage and protecting photosystem II: a mechanistic approach. **Plants**, v. 12, art. 502, p. 1-21, 2023.
- KUMAR, V.; PARIHAR, R. D.; SHARMA, A.; BAKSHI, P.; SIDHU, G. P. S.; BALI, A. S.; KARAOUZAS, I.; BHARDWAJ, R.; THUKRAL, A. K.; GYASI-AGYEI, Y.; RODRIGO-COMINO, J. Global evaluation of heavy metal content in surface water bodies: a meta-analysis using heavy metal pollution indices and multivariate statistical analyses. **Chemosphere**, v. 236, art. 124364, 2019.
- LI, X.; LI, J.; ISLAM, F.; NAJEEB, U.; PAN, J.; HOU, Z.; SHOU, J.; QIN, Y.; XU, L. 5-Aminolevulinic acid could enhance the salinity tolerance by alleviating oxidative damages in *Salvia miltiorrhiza*. **Food Science and Technology**, Campinas, v. 42, e103121, p. 1-9, 2022.
- MARUYAMA-NAKASHITA, A.; HIRA, M. Y.; FUNADA, S.; FUEK, S. Exogenous application of 5-aminolevulinic acid increases the transcript levels of sulfur transport and assimilatory genes, sulfate uptake, and cysteine and glutathione contents in *Arabidopsis thaliana*. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 56, p. 281-288, 2010.
- METWALLY, A.; FINKEMEIER, I.; GEORGI, M.; DIETZ, K. J. Salicylic acid alleviates the cadmium toxicity in barley seedlings. **Plant Physiology**, v. 132, p. 272-281, 2003.
- MEURER, E. J. Fundamentos de química do solo. 5. ed. Evangraf, 2006.
- MISHRA, V. K.; TRIPATHI, B. D. Concurrent removal and accumulation for heavy metals by the three aquatic macrophytes. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 7091-7097, 2008.
- OLIVEIRA, J. A.; CAMBRAIA, J.; OLIVA, M. A.; JORDÃO, C. P. Absorção e acúmulo de cádmio e seus efeitos sobre o crescimento relativo de plantas de salvinia e aguapé. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Viçosa-MG, v. 13, n. 3, p. 329-341, 2001.

- PANDEY, N.; SHARMA, C. P. Effect of heavy Co^{2+} , Ni^{2+} and Cd^{2+} on growth and metabolism of cabbage. **Plant Science**, v. 163, p. 753-758, 2002.
- PEREIRA, G. J. G.; MOLINA, S. M. G.; LEA, P. J.; AZEVEDO, R. A. Activity of antioxidant enzymes in response to cadmium in *Crotalaria juncea*. **Plant and Soil**, v. 239, p. 123-132, 2002.
- RHAMAN, M. S. et al. 5-aminolevulinic acid-mediated plant adaptive responses to abiotic stress. **Plant Cell Reports**, v. 40, n. 8, p. 1451-1469, 2021.
- SAIDON, N. B.; SZABÓ, R.; BUDAI, P.; LEHEL, J. Trophic transfer and biomagnification potential of environmental contaminants: heavy metals in aquatic ecosystems. **Environmental Pollution**, v. 340, art. 122815, 2024.
- SCHÜTZENDÜBEL, A.; POLLE, A. Plant responses to abiotic stresses: heavy metal-induced oxidative stress and protection by mycorrhization. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, p. 1351-1365, 2002.
- SCHÜTZENDÜBEL, A.; SCHWANZ, P.; TEICHMANN, T.; GROSS, K.; LANGENFELD-HEYSER, R.; GODBOLD, D. L.; POLLE, A. Cadmium-induced changes in antioxidative systems, hydrogen peroxide content, and differentiation in scots pine roots. **Plant Physiology**, v. 127, p. 887-898, 2001.
- SHAARI, N. E. M.; TAJUDIN, M. T. F. M.; KHANDAKER, M. M.; MAJRASHI, A.; ALENAZI, M. M.; ABDULLAHI, U. A.; MOHD, K. S. Cadmium toxicity symptoms and uptake mechanism in plants: a review. **Brazilian Journal of Biology**, v. 84, e252143, 2024.
- SHAH, K.; KUMAR, R. G.; VERMA, S.; DUBEY, R. S. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings. **Plant Science**, v. 161, p. 1135-1144, 2001.
- SHARMA, P.; DUBEY, R. S. Lead toxicity in plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, p. 35-52, 2005.
- SOLTAN, M. E.; RASHED, M. N. Laboratory study on the survival of water hyacinth under several conditions of heavy metal concentrations. **Advances in Environmental Research**, v. 7, p. 321-334, 2003.
- SOUZA, V. L.; SILVA, D. C.; SANTANA, K. B.; MIELKEL, M. S.; ALMEIDA, A.-A. F.; MANGABEIRA, P. A. O.; ROCHA, E. A. Efeitos do cádmio na anatomia e na fotossíntese de duas macrófitas aquáticas. **Acta Botanica Brasilica**, Ilhéus-BA, v. 23, n. 2, p. 343-354, 2009.
- SWAIN, C. K. Environmental pollution indices: a review on concentration of heavy metals in air, water, and soil near industrialization and urbanisation. **Discover Environment**, v. 5, n. 2, p. 1-14, 2024.
- TAN, S.; CAO, J.; XIA, X.; LI, Z. Advances in 5-aminolevulinic acid priming to enhance plant tolerance to abiotic stress. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, p. 1-70, 2022.

- VECCHIA, F. D.; LA ROCCA, N.; MORO, I.; FAVERI, S.; ANDREOLI, C.; RASCIO, N. Morphogenetic ultrastructural and physiological damages suffered by submerged leaves of *Elodea canadensis* exposed to cadmium. **Plant Science**, v. 168, n. 2, p. 329-338, 2005.
- VIEIRA, R. L.; CORRÊA, E. S.; MORAES, B. S.; ROSSATO, M. V.; VESTENA, S. Toxicidade de cádmio em plantas. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 1574-1588, 2015.
- VITÓRIA, A. P.; LEA, P. J.; AZEVEDO, R. A. Antioxidant enzymes responses to cadmium in radish tissues. **Phytochemistry**, v. 57, p. 710-715, 2001.
- WANCURA, G. C.; MILANESI, P. M. Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi in plant tolerance to cadmium: a systematic review. **Scientific Electronic Archives**, v. 18, p. 1-5, 2025.
- WANG, L. J.; JIANG, W. B.; HUANG, B. J. Promotion of 5-aminolevulinic acid on photosynthesis of melon (*Cucumis melo*) seedlings under low light and chilling stress conditions. **Physiologia Plantarum**, v. 121, p. 258-264, 2004.
- WATANABE, K.; TANAKA, T.; HOTTA, Y.; KURAMOCHI, H.; TAKEUCHI, Y. Improving salt tolerance of cotton seedlings with 5-aminolevulinic acid. **Plant Growth Regulation**, v. 32, p. 97-101, 2000.
- XU, L.; ALI, B.; GILL, R. A.; LI, L.; ZHOU, W. J. Alleviation of cadmium toxicity by 5-aminolevulinic acid is related to improved nutrients uptake and lowered oxidative stress in *Brassica napus*. **International Journal of Agriculture and Biology**, v. 18, n. 3, p. 557-564, 2016.

CAPÍTULO XVIII

AÇÃO DO ÁCIDO 5-AMINOLEVULÍNICO NO METABOLISMO DO NITROGÊNIO DE MUDAS DE PALHETEIRA (*CLITORIA FAIRCHILDIANA*) SUBMETIDAS A DOSES DE CÁDMIO

ACTION OF 5-AMINOLEVULINIC ACID ON THE BIOCHEMICAL METABOLISM OF PALHETEIRA SEEDLINGS (*CLITORIA FAIRCHILDIANA*) SUBJECTED TO CADMIUM DOSES

DOI: 10.51859/amplla.mac6200-18

Vitoria Luiza dos Passos¹

Paula Daniele Martins Moraes²

Marcele Farias Pereira³

Angela Batista Guimarães¹

Vitor Resende do Nascimento⁴

Cândido Ferreira de Oliveira Neto⁵

¹ Mestranda em Ciências Florestais. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais – UFRA

² Doutoranda em Ciências Florestais. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais – UFRA

³ Mestre em Ciências Florestais. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais – UFRA

⁴ Doutor em Biodiversidade e Biotecnologia - Rede BIONORTE pela Universidade Federal do Pará - UFPA

⁵ Professor Adjunto. Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

RESUMO

A contaminação por metais pesados representa um importante fator de estresse abiótico, capaz de comprometer o metabolismo e o desenvolvimento das plantas. Nesse contexto, o uso de compostos atenuantes destaca-se por favorecer mecanismos de tolerância vegetal, contribuindo para a redução dos danos provocados por condições ambientais adversas. Dessa forma, o estudo objetivou avaliar o potencial do ácido 5-aminolevulínico (5-ALA) como agente atenuador dos efeitos tóxicos do cádmio (Cd) em mudas de palheteira (*Clitoria fairchildiana* R.A. Howard). O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), entre os meses de maio e agosto de 2023. O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados (DBC), composto por nove tratamentos e quatro repetições, totalizando 36 unidades experimentais. As mudas foram submetidas a três concentrações de cloreto de cádmio (0, 15 e 30 mg. L⁻¹) e três doses de 5-ALA (0, 50 e 100 mg. L⁻¹). Foram avaliadas as variáveis bioquímicas: Redutase do Nitrato (RNO3⁻), Nitrato (NO3⁻), Amônio Livre (NH4⁺), Aminoácidos Solúveis Totais, Proteínas Solúveis Totais, Prolina e Glicina-Betaína. Os resultados indicam que o ácido

5-ALA contribuiu para a mitigação dos efeitos do estresse por Cd, promovendo respostas mais expressivas nas concentrações de amônio livre (NH4⁺) e prolina nas raízes. Entretanto, seu efeito sobre a atividade da redutase do nitrato (RNO3⁻) foi menos evidente, demonstrando respostas diferenciadas entre as variáveis bioquímicas analisadas.

Palavras-chave: Atenuante. Tolerância. Metais pesados.

ABSTRACT

Heavy metal contamination represents a major abiotic stress factor capable of compromising plant metabolism and development. In this context, the use of attenuating compounds stands out for favoring plant tolerance mechanisms, contributing to the reduction of damage caused by adverse environmental conditions. Thus, this study aimed to evaluate the potential of 5-aminolevulinic acid (5-ALA) as an attenuating agent of the toxic effects of cadmium (Cd) on *Clitoria fairchildiana* R.A. Howard seedlings. The experiment was conducted in a greenhouse at the Federal Rural University of the Amazon (UFRA) between May and August 2023. A



randomized block design (RBD) was adopted, consisting of nine treatments with four replications, totaling 36 experimental units. Seedlings were subjected to three cadmium chloride concentrations (0, 15, and 30 mg L⁻¹) and three 5-ALA doses (0, 50, and 100 mg L⁻¹). The following biochemical variables were evaluated: nitrate reductase (NR), nitrate (NO₃⁻), free ammonium (NH₄⁺), total soluble amino acids, total soluble proteins, proline, and glycine-betaine. The results

indicate that 5-ALA contributed to mitigating the effects of Cd stress, promoting more expressive responses in free ammonium (NH₄⁺) and proline concentrations in the roots. However, its effect on nitrate reductase (NR) activity was less evident, demonstrating differentiated responses among the analyzed biochemical variables.

Keywords: Mitigating agent. Tolerance. Heavy metals.

1. INTRODUÇÃO

A *Clitoria fairchildiana* R.A. Howard é uma espécie florestal pertencente à família Fabaceae-Papilionoideae, nativa do Brasil, com ocorrência natural nos estados do Pará e Amapá (Cruz, 2019). A espécie apresenta maior predominância em áreas de Floresta Ombrófila Densa da Amazônia, especialmente em formações secundárias estabelecidas sobre solos férteis e úmidos. Entretanto, também pode ocorrer em áreas abertas e antropizadas. Popularmente conhecida como palheteira, sombreiro ou faveira, caracteriza-se por ser uma árvore de porte médio a grande, com copa densa, flores atro-violáceas dispostas em racemos pendentes e frutos do tipo legume deiscentes. Além disso, possui capacidade de fixação biológica de nitrogênio (Moreira et al., 1992) e apresenta rápido crescimento (Corrêa, 1978), podendo atingir aproximadamente 20 m de altura e 80 cm de diâmetro (Paula; Alves, 2007). Devido à madeira moderadamente pesada e de resistência intermediária, a espécie é utilizada na construção civil. Adicionalmente, apresenta potencial ornamental, sendo recomendada para arborização urbana e programas de reflorestamento heterogêneo, em virtude de seu rápido crescimento e rusticidade (Silva; Môro, 2008).

Os metais pesados, por sua vez, ocorrem naturalmente no ambiente, originando-se principalmente do intemperismo das rochas, cuja composição contém diferentes elementos metálicos (Araújo; Pinto Filho, 2010). Entre esses metais, destaca-se o cádmio (Cd), elemento químico raro na natureza em estado puro, que tende a se acumular em solos e sedimentos de sistemas aquáticos, favorecendo sua absorção pelo sistema radicular das plantas. Quando expostas a concentrações tóxicas de Cd, as plantas apresentam rápida redução da capacidade de absorção e acúmulo radicular, principalmente em decorrência dos efeitos negativos sobre o metabolismo vegetal (Souza et al., 2009). De modo geral, o cádmio apresenta elevada toxicidade e não desempenha função essencial no metabolismo das plantas, sendo

considerado um importante contaminante ambiental em áreas agrícolas, naturais ou de mineração submetidas ao uso intensivo de fertilizantes e herbicidas (Vieira et al., 2015).

Diante disto, estudos a respeito do ácido 5-aminolevulínico vem revelando que o seu uso tem se mostrado bastante eficaz no estímulo das plantas a tolerar estresses advindos do meio ambiente (Hotta et al., 1997). Este também é um precursor essencial na biossíntese da clorofila, assim como o seu uso de forma externa nas plantas vem se mostrando eficaz no auxílio do crescimento das mesmas (Teixeira, 2023). Assim, o objetivo do presente trabalho foi de avaliar o comportamento do ácido 5-aminolevulínico como atenuante no metabolismo do nitrogênio em plantas de palheteira (*Clitoria fairchildiana*) submetidas a doses de cádmio.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. CONDIÇÕES DE CRESCIMENTO

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), localizada em Belém-PA, no período de maio a agosto de 2023. O clima da região é classificado como Af, segundo a classificação de Köppen e Geiger, caracterizado por elevada pluviosidade, temperatura média anual de 26,8 °C e umidade relativa do ar em torno de 95%. As sementes de *Clitoria fairchildiana* foram coletadas entre os meses de janeiro e fevereiro de 2023, em área pertencente à própria UFRA, em Belém-PA.

Mudas de palheteira com aproximadamente três meses de idade foram transplantadas de bandejas contendo vermiculita para vasos de polietileno com capacidade de 3 kg, preenchidos com terra preta coletada na camada de 0–20 cm em área de mata nativa da UFRA. O solo foi seco ao ar, destorreado e peneirado (2 mm). Para a caracterização química e análise granulométrica do solo (Tabelas 1 e 2), coletou-se uma amostra composta de aproximadamente 200 g, enviada ao laboratório IBRA Megalab (Sumaré-SP). Foi realizada a correção da acidez e fertilização com macro e micronutrientes. As mudas foram regadas diariamente conforme a capacidade de campo.

Tabela 1 – Análise química do solo da camada de 0-20 cm de profundidade.

Prof.	pH	MO	P	K ⁺	Ca+Mg	Ca ²⁺	Al	H+Al	SB	CTC (ph7)	V* m**
-	CaCl ₂	g/Kg	mg/dm ³	mmol _c /dm ³							%
0-20	3,5	29	6	0,6	6	4	18	133	7	140	5 72

pH = potencial hidrogeniônico; MO = matéria orgânica; P = fósforo; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; Al = alumínio; H = hidrogênio; CTC = capacidade de troca catiônica; SB = soma de bases; * saturação por bases; ** saturação por alumínio.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 – Análise granulométrica do solo da camada de 0-20 cm de profundidade.

Camada	argila	areia	silte	Classificação textural
cm		g kg ⁻¹		SBCS*
0-20	212	693	95	Franco-argiloarenosa

*Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.

Fonte: Autoria própria.

2.2. APLICAÇÃO DO ÁCIDO 5-AMINOLEVULÍNICO (5-ALA) E DOSES DE CÁDMIO

Passando-se dez dias após o transplântio (10^o DAT), fez a aplicação nas plantas de ácido 5-aminolevulínico em spray via foliar com borrifador, preparado com água deionizada e TWEEN 20 para melhor fixação e aderência do 5-ALA nas folhas de cada planta, conforme as concentrações de 0 (controle), 50 e 100 mg/L, uma vez por semana no período de 5 semanas, em um total de 5 aplicações, sempre no horário de 17h. Após as 5 semanas de aplicação do 5-ALA, e mais três dias de aclimação, aplicou-se aproximadamente 300mL (capacidade de campo) de cloreto de Cádmio em todos os vasos, em uma única aplicação (42 DAT), por meio de 3 doses de Cádmio (CdCl₂.H₂O): 0, 15 e 30 mg/L.

2.3. COLETA E ARMAZENAMENTO DO MATERIAL

Retirou-se o experimento depois de 4 semanas (28 dias) da aplicação das doses de cloreto de Cádmio e 70 dias da implantação, e com o material já coletado, fez-se a separação em: caules, raízes e folhas, e todos foram armazenados em sacos de plástico identificados e postos no freezer para posterior análises em laboratório. Para a utilização deste material em

análises bioquímicas, parte das folhas e raízes foram levadas para liofilizar em liofilizador (modelo LS 3000, da marca Terroni).

2.4. ANÁLISES BIOQUÍMICAS

As análises bioquímicas foram feitas no Laboratório de Estudos da Biodiversidade em Plantas Superiores (EBPS), na Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), no qual determinou-se os teores de Redutase do Nitrato (RNO_3^-) (Hageman e Hucklesby, 1971), Nitrato (NO_3^-) (Cataldo et al., 1975), Amônio Livre (NH_4^+) (Weatherburn, 1967), Aminoácidos Solúveis Totais (Peoples et al., 1989), Proteínas Solúveis Totais (Bradford, 1976), Prolina (Bates et al., 1973) e Glicina-Betáína (Grieve; Grattan, 1983).

2.5. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foi utilizado o delineamento experimental em blocos casualizados (DBC), em esquema fatorial 3×3 : três concentrações de Cd (0, 15 e 30 mg L^{-1}); e três concentrações de 5-ALA (0, 50 e 100 mg L^{-1}), com quatro repetições, totalizando 36 unidades experimentais (uma planta/vaso).

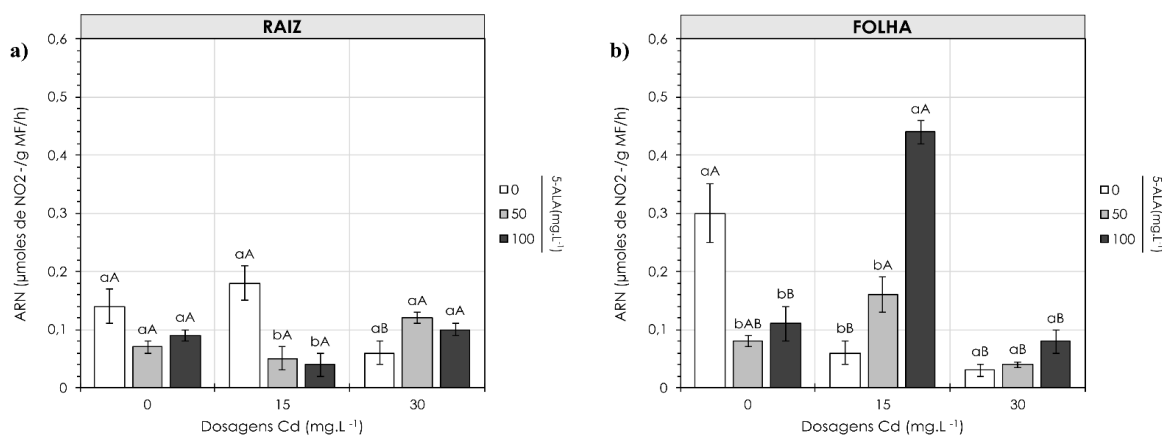
Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F, e quando significativos, aplicou-se o teste de Tukey para comparação das médias dos tratamentos a nível de 5% de probabilidade. Os dados coletados foram analisados no programa estatístico AgroEstat (Barbosa e Júnior, 2014), e os gráficos foram gerados no software Microsoft Office Excel versão 2016.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. ATIVIDADE DA REDUTASE DO NITRATO (RNO_3^-)

Observa-se baixa atividade na raiz, em que os tratamentos correspondentes às doses de 0 e 15 mg L^{-1} de Cd apresentaram as maiores concentrações em comparação aos demais tratamentos (Figura 1a). Nas folhas as concentrações da enzima redutase do nitrato foram reduzidas na maioria dos tratamentos, destacando-se apenas o tratamento controle da dose de 0 mg L^{-1} de Cd e o tratamento com 100 mg L^{-1} de 5-ALA da dose 15 mg L^{-1} de Cd que apresentaram os maiores valores de atividade enzimática (Figura 1b).

Figura 1 - Influência do Ácido 5-aminolevulínico (0, 50 e 100 mg. L⁻¹) nos teores da redutase do nitrato (a – raiz; b– folha) em mudas de palheteira (*Clitoria fairchildiana* R.A. Howard) sob estresse por cádmio (0, 15 e 30 mg. L⁻¹). Letras minúsculas indicam diferenças estatísticas entre os tratamentos 5-ALA (p<0,05) com base no teste Tukey; letras minúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com cádmio ((p<0,05) com base no teste Tukey. NS: Não significativo (p<0,05). Média ± Erro padrão.



Fonte: Autoria própria.

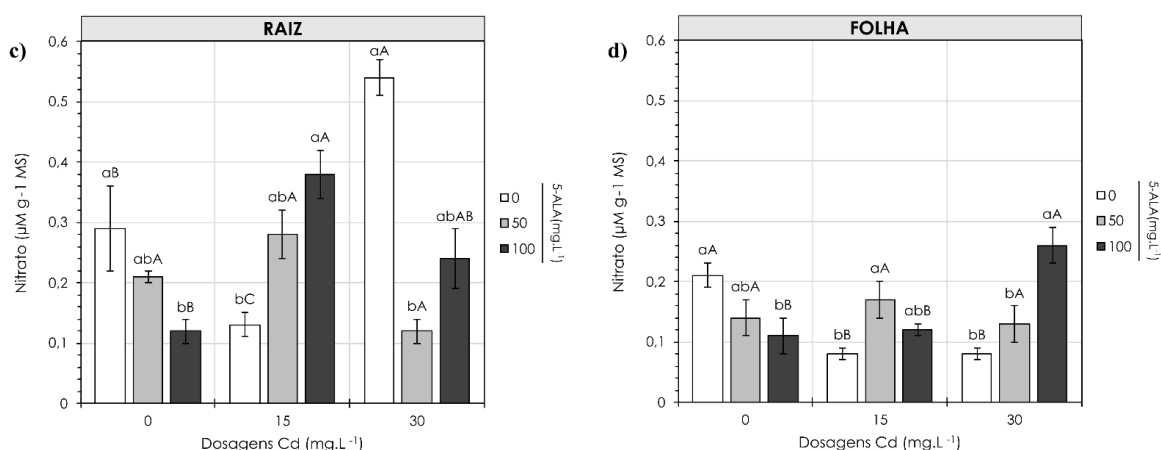
A enzima redutase do nitrato (RN) é a principal responsável pela absorção de nitrogênio pelos vegetais, sendo sua atividade influenciada pela disponibilidade de água no solo. Medir sua atividade permite indicar a resposta fisiológica das plantas sob estresses ambientais (Rhein et al., 2011). A redução da atividade enzimática observada, principalmente nas raízes, pode estar associada à dependência da RN em relação à energia fornecida pela fotossíntese, especialmente na forma de NAD(P)H. As altas concentrações de cádmio podem ter afetado essa energia, de modo que a boa condição fisiológica da planta repercute no crescimento da atividade da RN (Marschner, 2012). Além disso, em condições de estresse abiótico, a redutase do nitrato pode atuar como um importante biomarcador de tolerância vegetal a metais fitotóxicos, considerando que a exposição ao cádmio tende a reduzir sua atividade e produção nos tecidos vegetais (Singh et al., 2015).

3.2. CONCENTRAÇÃO DE NITRATO (NO₃⁻)

Observou-se, nas raízes, que o tratamento controle sem aplicação de 5-ALA (0 mg L⁻¹), na ausência de cádmio, apresentou a maior concentração de nitrato. Na dose de 15 mg L⁻¹ de Cd, os resultados mostraram-se mais expressivos, sendo observado menor concentração apenas no tratamento que não recebeu aplicação do ácido. Já na dose de 30 mg L⁻¹ de Cd, o tratamento controle destacou-se dos demais por apresentar a maior concentração de nitrato (Figura 2c). Nas folhas, as concentrações de nitrato foram inferiores às observadas na raiz. Os

tratamentos que apresentaram os maiores valores corresponderam a 0 mg L⁻¹ de 5-ALA na dose controle de Cd, 50 mg L⁻¹ de 5-ALA na dose de 15 mg L⁻¹ de Cd e 100 mg L⁻¹ de 5-ALA na dose de 30 mg L⁻¹ de Cd (Figura 2d).

Figura 2 - Influência do Ácido 5-aminolevulínico (0, 50 e 100 mg. L⁻¹) nos teores de nitrato (NO₃⁻) (c – raiz; d– folha) em mudas de palheteira (*Clitoria fairchildiana* R.A. Howard) sob estresse por cádmio (0, 15 e 30 mg. L⁻¹). Letras minúsculas indicam diferenças estatísticas entre os tratamentos 5-ALA (p<0,05) com base no teste Tukey; letras minúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com cádmio ((p<0,05) com base no teste Tukey. NS: Não significativo (p<0,05). Média ± Erro padrão.



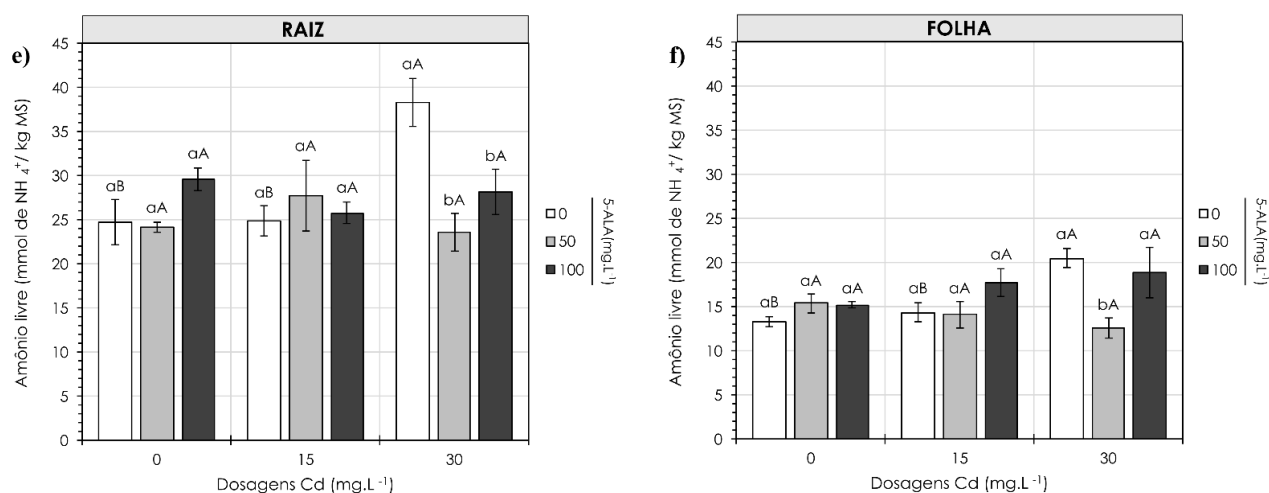
Fonte: Autoria própria.

O aumento considerável de nitrato em alguns tratamentos é considerado normal, pois o NO₃⁻ é uma das principais formas de entrada do nitrogênio nas plantas. Após ser assimilado pelas raízes, pode ser reduzido no citosol e armazenado no vacúolo (Lourinho, 2020). Em situações de excesso de metais pesados, as plantas alteram o fluxo normal do nitrato, estocando-o em órgãos mais prejudicados pelo metal (Li et al., 2010; Zhang et al., 2014).

3.3. CONCENTRAÇÃO DE AMÔNIO LIVRE (NH₄⁺)

É notável que os teores de amônio livre na raiz foram satisfatórios, e destacam-se principalmente, o tratamento de 100 mg. L⁻¹ de 5-ALA na dose controle de Cd, o tratamento de 50 mg. L⁻¹ de 5-ALA na dose 15 de Cd e o tratamento de 0 mg. L⁻¹ de 5-ALA na dose de 30 mg. L⁻¹ de Cd, com a maior concentração de amônio (Figura 3e). Já na folha os resultados foram consideravelmente baixos se comparados à raiz, onde na dose de 30 mg. L⁻¹ de Cd as maiores concentrações foram nos tratamentos de 0 e 100 mg. L⁻¹ de 5-ALA se destacando dos demais tratamentos (Figura 3f).

Figura 3 - Influência do Ácido 5-aminolevulínico (0, 50 e 100 mg. L⁻¹) nos teores de amônio livre (NH₄⁺) (e – raiz; f– folha) em mudas de palheteira (*Clitoria fairchildiana* R.A. Howard) sob estresse por cádmio (0, 15 e 30 mg. L⁻¹). Letras minúsculas indicam diferenças estatísticas entre os tratamentos 5-ALA (p<0,05) com base no teste Tukey; letras minúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com cádmio ((p<0,05) com base no teste Tukey. NS: Não significativo (p<0,05). Média ± Erro padrão.



Fonte: Autoria própria.

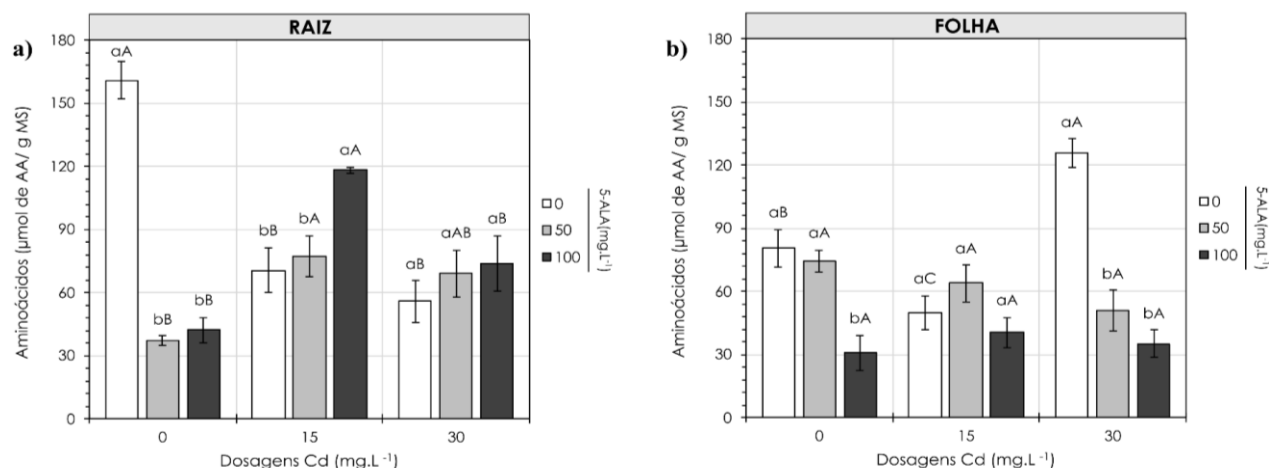
Uma possível explicação para as altas concentrações de amônio nas raízes é a ação do cádmio associada à enzima glutamina sintetase (GS), que possui isoformas nos plastídios (GS2) e no citosol (GS1) (Swarbreck et al., 2011). A GS1 citosólica é importante na assimilação primária do amônio e na sua reciclagem durante a degradação de proteínas. Já a GS2 atua na reassimilação do amônio da fotorrespiração nos cloroplastos e na assimilação do amônio proveniente da redução do nitrato nos plastídios (Thomsen et al., 2014). As menores concentrações de amônio nas folhas devem-se às baixas concentrações de nitrato e à baixa atividade da enzima redutase do nitrato (RN), pois essa enzima participa diretamente das reações que convertem nitrato em nitrito e, posteriormente, em amônio (Marschner, 2012).

3.4. CONCENTRAÇÃO DE AMINOÁCIDOS SOLÚVEIS TOTAIS

Em relação aos aminoácidos na raiz, a maior concentração do soluto, na dose controle de cádmio, foi observada no tratamento sem aplicação de 5-ALA. Nas doses subsequentes de Cd (15 e 30 mg L⁻¹), as concentrações mantiveram-se semelhantes entre os tratamentos, embora os maiores teores tenham sido registrados nos tratamentos submetidos à aplicação de 100 mg L⁻¹ de 5-ALA (Figura 4a). Nas folhas, verificou-se comportamento semelhante ao observado nas raízes, com baixas concentrações na maioria dos tratamentos. Entretanto, o

tratamento controle na dose de 30 mg L⁻¹ de Cd destacou-se em relação aos demais, apresentando os maiores valores observados (Figura 4b).

Figura 4 - Influência do Ácido 5-aminolevulínico (0, 50 e 100 mg. L⁻¹) nos teores de aminoácidos solúveis totais (a – raiz; b– folha) em mudas de palheteira (*C. fairchildiana*) sob estresse por cádmio (0, 15 e 30 mg. L⁻¹). Letras minúsculas indicam diferenças estatísticas entre os tratamentos 5-ALA (p<0,05) com base no teste Tukey; letras minúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com cádmio ((p<0,05) com base no teste Tukey. NS: Não significativo (p<0,05). Média ± Erro padrão.



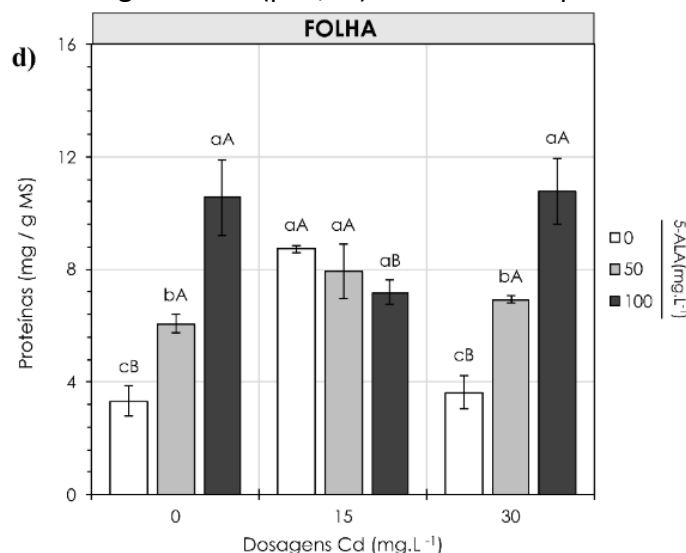
Fonte: Autoria própria.

Nas folhas, as concentrações desse soluto foram inferiores, possivelmente em decorrência da elevada reatividade do cádmio com os aminoácidos, especialmente com os átomos de nitrogênio (N) presentes em suas estruturas (Nogueira, 2018). Outro fator que pode ter contribuído para os baixos teores observados foi a redução das concentrações de nitrato em determinados tratamentos, considerando que o NO₃⁻ desempenha papel fundamental na assimilação de nitrogênio pelas plantas (Nogueira, 2018). De acordo com Oliveira (2005), o acúmulo mais expressivo de aminoácidos nas raízes pode estar relacionado à diminuição da translocação desses compostos para outros órgãos da planta, em razão da ação de enzimas proteolíticas e de alterações estruturais nos tecidos do floema.

3.5. CONCENTRAÇÃO DE PROTEÍNAS SOLÚVEIS TOTAIS

Na folha os tratamentos que receberam aplicação de 100 mg.L⁻¹ de 5-ALA tiveram grandes concentrações tanto na dose controle como na de 30 mg.L⁻¹ de Cd, na dose de 15 mg.L⁻¹ de cádmio os tratamentos com maior acúmulo de proteínas foram os de 0 e 50 mg.L⁻¹ de 5-ALA, os demais tratamentos resultaram em baixas concentrações. Em geral, a ação do ácido foi mediana nas folhas (Figura 5d).

Figura 5 - Influência do Ácido 5-aminolevulínico (0, 50 e 100 mg. L⁻¹) nos teores de proteínas solúveis totais (d- folha) em mudas de palheteira (*Clitoria fairchildiana* R.A. Howard) sob estresse por cádmio (0, 15 e 30 mg. L⁻¹). Letras minúsculas indicam diferenças estatísticas entre os tratamentos 5-ALA (p<0,05) com base no teste Tukey; letras minúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com cádmio ((p<0,05) com base no teste Tukey. NS: Não significativo (p<0,05). Média ± Erro padrão.



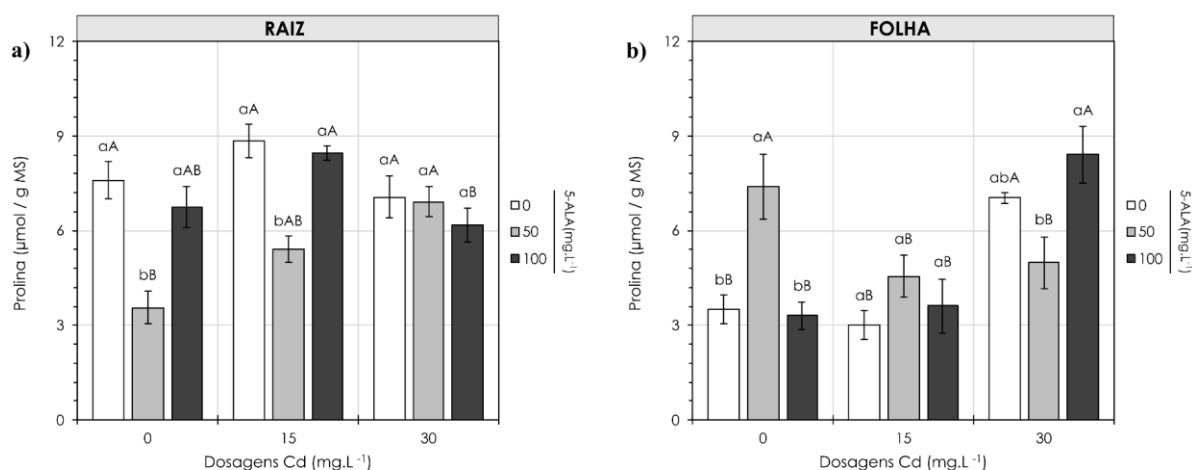
Fonte: Autoria própria.

Nas folhas, existem proteínas que atuam na formação de estoques de nitrogênio e se acumulam nesse órgão, o que pode explicar o acúmulo do soluto (Ashraf; Harris, 2004). O estresse promove o aumento desses compostos orgânicos para permitir o ajuste osmótico, além de servirem como reserva de energia e fonte de carbono para a formação dos tecidos nas plântulas quando estas estão sob estresse (Teixeira, 2023).

3.6. CONCENTRAÇÃO DE PROLINA

Na raiz o ácido se mostrou bastante eficaz, haja vista que grande parte dos tratamentos obtiveram grandes concentrações de prolina, apenas os tratamentos com 50 mg.L⁻¹ de 5-ALA tanto na dose controle como na de 15 mg.L⁻¹ de Cd resultaram em menor acúmulo (Figura 6a). Para as folhas os resultados foram contrários, visto que as maiores concentrações de prolina foram nos tratamentos com 50 mg.L⁻¹ de 5-ALA na dose controle e com 0 e 100 mg. L⁻¹ de 5-ALA na dose de 30 mg. L⁻¹ de Cd (Figura 6b).

Figura 6 - Influência do Ácido 5-aminolevulínico (0, 50 e 100 mg. L⁻¹) nos teores de prolina (a – raiz; b– folha) em mudas de palheteira (*Clitoria fairchildiana* R.A. Howard) sob estresse por cádmio (0, 15 e 30 mg. L⁻¹). Letras minúsculas indicam diferenças estatísticas entre os tratamentos 5-ALA (p<0,05) com base no teste Tukey; letras minúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com cádmio ((p<0,05) com base no teste Tukey. NS: Não significativo (p<0,05). Média ± Erro padrão.



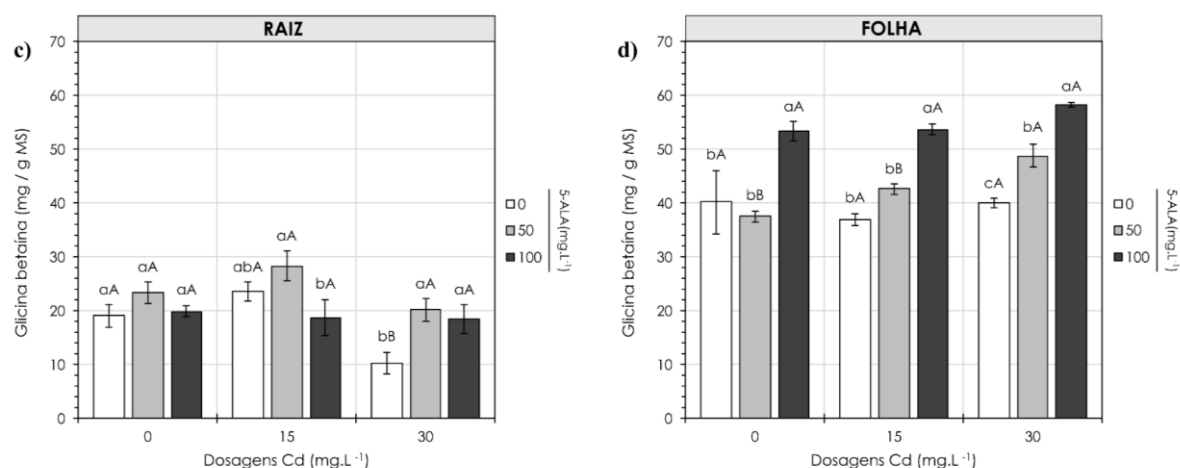
Fonte: Autoria própria.

A maior quantidade de prolina na raiz indica que a planta sob estresse é eficiente em acumular esse soluto, que atua como estabilizador de proteínas e quelante de metais, reduzindo a toxicidade (Sharma; Dubey, 2005). Esse aumento está relacionado à manutenção do ajuste osmótico em plantas sob estresse abiótico (Yaish, 2015). Sob influência de estresses, a síntese de proteínas diminui, enquanto aminoácidos e aminas livres se acumulam, alterando as proporções de aminoácidos e elevando a concentração de prolina livre. Esse acúmulo tem função osmoprotetora, prevenindo a desnaturação de proteínas e preservando a estrutura enzimática (Campos et al., 2011).

3.7. CONCENTRAÇÃO DE GLICINA-BETAÍNA

Os teores de glicina nas raízes foram baixos e semelhantes entre os tratamentos. Já nas folhas, as concentrações foram mais altas, com destaque para o tratamento com a maior dose de 5-ALA (100 mg. L⁻¹), que proporcionou o maior acúmulo de glicina (Figura 7).

Figura 7 - Influência do Ácido 5-aminolevulínico (0, 50 e 100 mg. L⁻¹) nos teores de glicina-betaína (c – raiz; d – folha) em mudas de palheteira (*Clitoria fairchildiana* R.A. Howard) sob estresse por cádmio (0, 15 e 30 mg. L⁻¹). Letras minúsculas indicam diferenças estatísticas entre os tratamentos 5-ALA (p<0,05) com base no teste Tukey; letras minúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com cádmio ((p<0,05) com base no teste Tukey. NS: Não significativo (p<0,05). Média ± Erro padrão.



Fonte: Autoria própria.

O aumento nos valores de glicina-betaína possivelmente ocorre devido à formação de aminoácidos solúveis totais a partir da degradação das proteínas solúveis totais e às altas concentrações de amônio livre, provenientes de processos de desaminação importantes para a formação das betaínas e para a fotorrespiração. Além de sua função osmoprotetora, essa molécula pode ser sintetizada a partir da colina ou de precursores, sendo utilizada na via metabólica para formar compostos relacionados à síntese do hormônio etileno e da molécula piruvato, bem como servir como fonte de nitrogênio, energia e carbono (Oliveira, 2015).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação exógena de diferentes doses de ácido 5-ALA em mudas de palheteira (*Clitoria fairchildiana*) promoveu efeitos positivos sobre o metabolismo do nitrogênio, especialmente nas variáveis amônio Livre (NH₄⁺), prolina, proteínas solúveis totais e glicina-betaína. Em contrapartida, foi observada menor eficiência nas concentrações da redutase do nitrato (RNO₃-), cujos teores apresentaram valores inferiores em relação às demais variáveis avaliadas do metabolismo nitrogenado.

De maneira geral, apesar da ocorrência de diferenças estatísticas entre os tratamentos, não foram verificadas variações acentuadas entre as variáveis analisadas, indicando que as plantas não foram submetidas a elevado nível de estresse. Esse

comportamento evidencia o relevante potencial da espécie para processos de fitorremediação. Dessa forma, conclui-se que o ácido 5-ALA atua como um importante agente atenuador dos efeitos do estresse causado por cádmio em plantas de palheteira.

REFERÊNCIAS

- ANAND, M.; KUMAR, B.; SHEEL, R. Effect of heavy metals on biochemical profile of *Azolla filiculoides*. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 6, n. 10, p. 3629-3653, 2017.
- ARAÚJO, J. B. S.; FILHO, J. L. O. P. Identificação de fontes poluidoras de metais pesados nos solos da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró/RN, na área urbana de Mossoró-RN. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 5, n. 2, p. 80-94, 2010.
- ASHRAF, M.; HARRIS, P. J. C. Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants. **Plant Science**, v. 166, p. 3-16, 2004.
- CAMPOS, M. K. F. et al. Drought tolerance and antioxidant enzymatic activity in transgenic 'Swingle' citrumelo plants over-accumulating proline. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 72, n. 2, p. 242-250, 2011.
- CORRÊA, M. P. Dicionário das plantas úteis e das exóticas cultivadas. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1978. v. 6.
- CRUZ, E. D. Germinação de sementes de espécies amazônicas: palheteira (*Clitoria fairchildiana* R. A. Howard). 1. ed. Belém: EMBRAPA, 2019. 7 p.
- GUIBOILEAU, A. et al. Senescence and death of plant organs: nutrient recycling and developmental regulation. **Comptes Rendus Biologies**, v. 333, n. 4, p. 382-391, 2010.
- HOTTA, Y. et al. Promotive effects of 5-aminolevulinic acid on the yield of several crops. **Plant Growth Regulation**, v. 22, p. 109-114, 1997.
- KAPOOR, D. et al. Photosynthetic efficiency, ion analysis and carbohydrate metabolism in *Brassica juncea* plants under cadmium stress. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 5, p. 279-286, 2016.
- LI, J.-Y. et al. The Arabidopsis nitrate transporter NRT1.8 functions in nitrate removal from the xylem sap and mediates cadmium tolerance. **Plant Cell**, v. 22, p. 1633-1646, 2010.
- LOURINHO, M. P. **Silício como mitigador dos efeitos do cádmio sobre o metabolismo bioquímico de *Khaya ivorensis* A. Chev.** Orientador: Cândido Ferreira de Oliveira Neto. 2020. 56 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2020.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 2. ed. San Diego: **Academic Press**, 2012. 889 p.

- MOREIRA, F. M. S.; SILVA, M. F.; FARIA, S. M. Occurrence of nodulation in legume species in the Amazon region of Brazil. **New Phytologist**, v. 121, n. 4, p. 563-570, 1992.
- NOGUEIRA, G. A. S. **Trocas gasosas, crescimento e comportamento bioquímico em plantas jovens de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) em diferentes concentrações de cádmio**. Orientador: Cândido Ferreira de Oliveira Neto. 2018. 70 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2018.
- OLIVEIRA, B. T. **Respostas ecofisiológicas e bioquímicas de plantas jovens de *Parkia pendula* (Willd.) Benth. ex Walp Urb. submetidas à deficiência hídrica**. Orientador: Cândido Ferreira de Oliveira Neto. 2015. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2015.
- OLIVEIRA, M. A. J. et al. Atividade da redutase de nitrato em mudas de pupunheira (*Bactris gasipaes*). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 515-522, 2005.
- PAULA, J. E.; ALVES, J. L. H. 897 madeiras nativas do Brasil: anatomia – dendrologia – dendrometria – produção – uso. Porto Alegre: Cinco Continentes, 2007. 438 p.
- RHEIN, A. F. L.; SANTOS, D. M. M.; CARLIN, S. D. Atividade da enzima redutase do nitrato e teores de prolina livre em raízes de cana-de-açúcar sob os estresses hídrico e ácido no solo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, n. 4, p. 1345-1360, 2011.
- SHARMA, P.; DUBEY, R. S. Lead toxicity in plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, p. 35-52, 2005.
- SILVA, B. M. S.; MÔRO, F. V. Aspectos morfológicos do fruto, da semente e desenvolvimento pós-seminal de faveira (*Clitoria fairchildiana* R. A. Howard – Fabaceae). **Revista Brasileira de Sementes**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 195-201, 2008.
- SINGH, R.; HEMANTARANJAN, A.; PATEL, P. K. Salicylic acid improves salinity tolerance in field pea (*Pisum sativum* L.) by intensifying antioxidant defense system and preventing salt-induced nitrate reductase (NR) activity loss. **Legume Research, Sadar**, v. 38, n. 2, p. 202-208, 2015.
- SOUZA, V. L. et al. Efeitos do cádmio na anatomia e na fotossíntese de duas macrófitas aquáticas. **Acta Botanica Brasilica**, Ilhéus, v. 23, n. 2, p. 343-354, 2009.
- SWARBRECK, S. M. et al. New perspectives on glutamine synthetase in grasses. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 4, p. 1511-1522, 2011.
- TEIXEIRA, S. K. B. **Aplicação do ácido 5-aminolevulínico como atenuador de estresse salino em plântulas de milho (*Zea mays* L.)**. Orientador: Cândido Ferreira de Oliveira Neto. 2023. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Belém, Belém, 2023.
- THOMSEN, H. C. et al. Cytosolic glutamine synthetase: a target for improvement of crop nitrogen use efficiency? **Trends in Plant Science**, v. 19, n. 10, p. 656-663, 2014.

- VIEIRA, R. L. et al. Toxicidade de cádmio em plantas. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 1574-1588, 2015.
- WANG, Y. et al. Response to nickel in the proteome of the metal accumulator plant *Brassica juncea*. **Journal of Plant Interactions**, v. 7, p. 230-237, 2012.
- YAISH, M. W. Proline accumulation is a general response to abiotic stress in the date palm tree (*Phoenix dactylifera* L.). **Genetics and Molecular Research**, v. 14, n. 3, p. 9943-9950, 2015.
- ZHAO, L. et al. Cd-induced changes in leaf proteome of the hyperaccumulator plant *Phytolacca americana*. **Chemosphere**, v. 85, p. 56-66, 2011.
- ZHANG, G. B.; YI, H.-Y.; GONG, J.-M. The *Arabidopsis* ethylene/jasmonic acid-NRT signaling module coordinates nitrate reallocation and the trade-off between growth and environmental adaptation. **Plant Cell**, v. 26, p. 3984-3998, 2014.

CAPÍTULO XIX

INDICADORES ECOLÓGICOS NA RESTAURAÇÃO DE FLORESTAS RIPÁRIAS NA AMAZÔNIA IMPACTADAS PELA MINERAÇÃO DE ESTANHO: UMA REVISÃO DE LITERATURA

ECOLOGICAL INDICATORS IN THE RESTORATION OF RIPARIAN FORESTS IN THE AMAZON IMPACTED BY TIN MINING: A LITERATURE REVIEW

DOI: 10.51859/amplla.mac6200-19

Marcele Farias Pereira¹

Paula Daniele Martins Moraes²

Brenda Rayana Ferreira da Silva³

Vitoria Luiza dos Passos⁴

Ricardo Christin Lobato Machado⁵

Walmer Bruno Rocha Martins⁶

¹ Mestre em Ciências Florestais. Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

² Doutoranda em Ciências Florestais. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais– UFRA

³ Mestranda em Ciências Ambientais. Instituto Tecnológico Vale – ITV

⁴ Mestranda em Ciências Florestais. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais– UFRA

⁵ Doutorando em Ciências Florestais. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais– UFRA

⁶ Professor da Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA.

RESUMO

As florestas ripárias da Amazônia são fundamentais para a manutenção da integridade ecológica das bacias hidrográficas, contribuindo para a proteção dos recursos hídricos, estabilidade do solo e conservação da biodiversidade. Contudo, esses ecossistemas vêm sendo intensamente degradados por atividades minerárias, como a mineração de estanho, que provoca alterações na estrutura, composição e funcionamento dos ecossistemas. Este capítulo tem como objetivo uma revisão de literatura sobre a importância das florestas ripárias, os impactos da mineração de estanho na Amazônia e as estratégias de restauração ecológica baseadas em indicadores ecológicos. Esses indicadores são discutidos a partir de três componentes interdependentes: Composição, relacionada à diversidade e abundância de espécies; estrutura, referente à organização física da vegetação; e função, que engloba processos ecológicos como ciclagem de nutrientes e fluxo de energia. A revisão indicou que a restauração com espécies nativas adaptadas às condições pós-mineração é uma estratégia eficaz, sobretudo quando associada a

práticas adequadas de manejo. Além disso, destaca-se a importância do monitoramento contínuo por meio de indicadores ecológicos, aliado ao uso de tecnologias como o sensoriamento remoto, para avaliar a trajetória da recuperação ambiental. Conclui-se que a integração entre composição, estrutura e função permite uma avaliação holística da restauração, contribuindo para práticas mais eficientes e para o alinhamento da atividade minerária aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, com ênfase no ODS 15.

Palavras-chave: Ecossistemas degradados. Restauração. Amazônia. Monitoramento.

ABSTRACT

Amazonian riparian forests are fundamental for maintaining the ecological integrity of watersheds, contributing to water resource protection, soil stability, and biodiversity conservation. However, these ecosystems have been severely degraded by mining activities, particularly tin mining, which causes significant changes in ecosystem structure, composition, and functioning. This chapter aims to

provide a literature review on the importance of riparian forests, the impacts of tin mining in the Amazon, and ecological restoration strategies based on ecological indicators. These indicators are discussed based on three interdependent components: composition, related to species diversity and abundance; structure, referring to the physical organization of vegetation; and function, encompassing ecological processes such as nutrient cycling and energy flow. The review indicates that restoration using native species adapted to post-mining conditions is an effective strategy, especially when combined with appropriate management practices. Furthermore, the importance of

continuous monitoring through ecological indicators is highlighted, along with the use of technologies such as remote sensing to assess restoration trajectories over time. It is concluded that integrating composition, structure, and function allows for a holistic evaluation of restoration, contributing to more effective practices and aligning mining activities with the United Nations Sustainable Development Goals, particularly SDG 15.

Keywords: Degraded ecosystems. Restoration. Amazon. Monitoring.

1. INTRODUÇÃO

As florestas ripárias da Amazônia desempenham papel crítico na manutenção da integridade ecológica de bacias hidrográficas, atuando como zonas de transição entre ecossistemas aquáticos e terrestres (Maracahipes-Santos *et al.*, 2020). Essas áreas, no entanto, vêm sendo severamente impactadas por atividades antrópicas como a mineração, que alteram a estrutura vegetal e as propriedades edáficas, comprometendo a prestação de serviços ecossistêmicos (Guimaraes *et al.*, 2021).

O Brasil figura entre os principais detentores de reservas de estanho (cassiterita) no mundo, uma vez que, em 2021 foram produzidas cerca de 24,1 milhões de toneladas, com destaque para os estados de Rondônia, Amazonas, Pará e Mato Grosso, que concentraram a maior parte da produção do minério (ANM, 2022). Embora tenha grande importância econômica, a mineração está associada a diversos impactos ambientais, incluindo remoção da cobertura vegetal, degradação do solo, contaminação hídrica e afastamento da fauna (IBRAM, 2024; Sonter *et al.*, 2017a; Žibret *et al.*, 2018). No caso do estanho, esses efeitos atingem especialmente os ecossistemas ripários, em função da ocorrência natural desse minério (Barbosa *et al.*, 2023; Guan *et al.*, 2020; Sonter *et al.*, 2017a).

Diante desse cenário, a restauração de florestas ripárias pós-mineração torna-se estratégica, principalmente aliada ao uso de indicadores ecológicos de composição, estrutura e função. A composição refere-se à diversidade e riqueza de espécies, a estrutura envolve características como altura e distribuição das plantas, e a função indica o restabelecimento de processos ecológicos (Evans *et al.*, 2019; Gatica-Saavedra, Echeverría, 2017a; Osović *et al.*, 2020; Truchy *et al.*, 2022). Em conjunto, esses indicadores mostram que o sucesso da

restauração depende não apenas do estabelecimento das espécies, mas também da recuperação das funções ecológicas ao longo do tempo (Gatica-Saavedra, Echeverría e Nelson, 2017b). Nesse sentido, este capítulo tem como objetivo analisar a importância das florestas ripárias, os impactos da mineração de estanho na Amazônia e as estratégias de restauração baseadas em indicadores ecológicos, visando contribuir para o aprimoramento do monitoramento da restauração em áreas degradadas por mineração e seu alinhamento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 15 (Adomako, 2022).

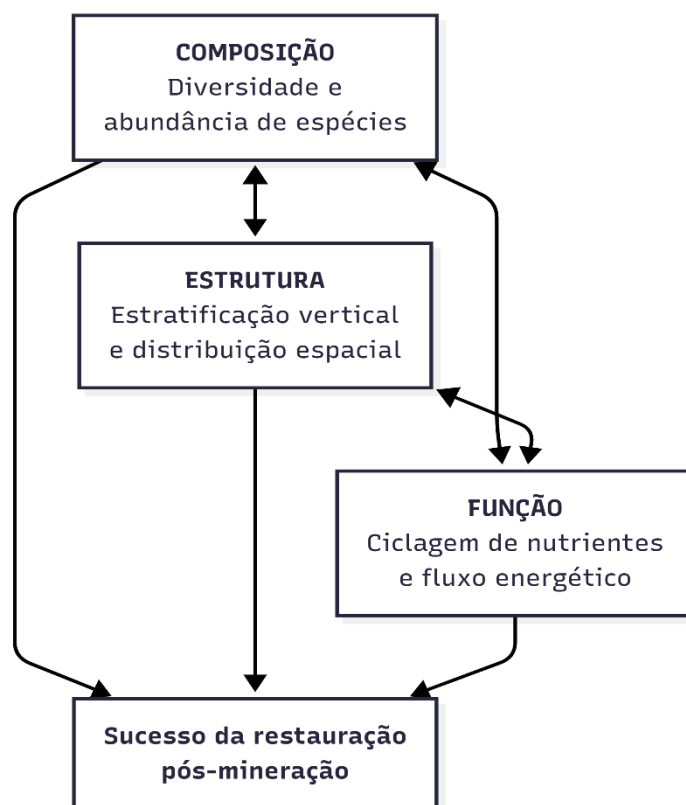
2. IMPORTÂNCIA DAS FLORESTAS RIPÁRIAS E DOS INDICADORES ECOLÓGICOS NA RESTAURAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO

As áreas de floresta próximas aos cursos d'água são indispensáveis para manter a integridade ecológica das bacias hidrográficas, atuando como zonas de transição entre ecossistemas aquáticos e terrestres (Maracahipes-Santos *et al.*, 2020). Na Amazônia, esses ecossistemas enfrentam desafios antrópicos crescentes, como desmatamento e atividades de mineração, onde a alteração da estrutura vegetal e das propriedades edáficas compromete seu equilíbrio e capacidade de prestação de serviços ecossistêmicos (Guimaraes *et al.*, 2021). A avaliação do estado e da resistência dessas florestas pode ser realizado com o uso de indicadores ecológicos robustos, capazes de capturar não apenas a estrutura da vegetação, mas também suas funções ecossistêmicas e sua capacidade de recuperação diante de possíveis impactos.

O uso de indicadores ecológicos é visto como uma maneira eficaz de avaliar o processos da restauração florestal, estes elementos atuam como componentes interdependentes sendo estes: (1) a composição, que abrange a diversidade e abundância de espécies, garantindo o restabelecimento da biodiversidade em níveis taxonômicos, genéticos e funcionais (Hautier *et al.*, 2017); (2) a estrutura, referente a organização física do ecossistema, incluindo estratificação vertical, distribuição espacial e heterogeneidade de micro-habitats, que determinam a disponibilidade de recursos e nichos ecológicos (Valbuena *et al.*, 2020); e (3) a função, que engloba processos ecológicos essenciais como ciclagem de nutrientes, fluxo energético e interações bióticas, responsáveis pela resiliência e autossustentabilidade do sistema (Philipson *et al.*, 2020). Esses elementos atuam sinergicamente, a composição influencia a estrutura, que por sua vez regula as funções,

enquanto os processos ecológicos mantêm a diversidade e organização do ecossistema, sendo fundamentais para avaliar o sucesso de iniciativas de restauração, especialmente em áreas críticas como florestas ripárias degradadas pela mineração (Figura 1).

Figura 1 – Interação entre composição, estrutura e função na restauração de florestas ripárias degradadas pela mineração.



Fonte: Autoria própria.

O monitoramento dos parâmetros ecológicos é indispensável para atingir sucesso na restauração florestal, pois indicadores como a riqueza e o recrutamento de espécies nativas, a matéria orgânica do solo e a ciclagem de nutrientes, fornecem dados críticos e quantificáveis sobre a evolução da trajetória de um ecossistema degradado (Gatica-Saavedra, Echeverría e Nelson, 2017b; Londe *et al.*, 2020). Além disso, a utilização de novas tecnologias como o sensoriamento remoto contribuem para melhores análises na recuperação ambiental (Li *et al.*, 2023). Nesse contexto, a monitorização rigorosa é necessária para validar metodologias da restauração, permitir a gestão adaptativa e, em última análise, garantir que os recursos ecológicos e investidos resultem em retornos tangíveis e biodiversidade a longo prazo (Fockink *et al.*, 2022).

3. CARACTERÍSTICAS DO ESTANHO

O *stannum*, etimologicamente derivado do latim, é um elemento químico cujo símbolo é Sn, encontra-se classificado na categoria dos metais não ferrosos e é encontrado raramente de forma isolada e pura, conhecida como estanho nativo (Rodrigues, 2001). A cassiterita (SnO_2) é o principal minério de estanho, composto por dióxido de Sn e obtendo entre 60% e 79% do minério (Rodrigues, 2001). Além disso, a cassiterita pode ser encontrada em formações rochosas primárias, o que requer técnicas de mineração subterrânea ou a céu aberto para sua extração. Normalmente este mineral é encontrado em aluviões ou depósitos aluviais, os quais estão localizados nas margens e encostas de cursos d'água (Barbosa *et al.*, 2023).

A versatilidade e as propriedades físicas e químicas do estanho tornam este mineral material essencial em diversas aplicações industriais e tecnológicas, como dispositivos eletrônicos, painéis de celulares, computadores, televisores, bem como em soldas para produção de ligas metálicas, filmes finos e na proteção contra corrosão de materiais fabricados com Nióbio e Tântalo (SAHU *et al.*, 2023). Além disso, o estanho é utilizado na indústria de embalagens, sendo empregado no revestimento de latas de aço para evitar a oxidação e prolongar a vida útil dos alimentos e bebidas (Ingulstad, 2017; Rogoff, 2013).

No Brasil, em 2021, a produção bruta de cassiterita extraída diretamente das lavras de mineração foi de 24,15 milhões de toneladas, com teor médio de 917,59 g/t, gerando uma movimentação econômica de 1,5 bilhão de reais em produção comercializada (ANM, 2022). O país figura entre os principais detentores de reservas de estanho (cassiterita) no mundo, com cerca de 419 mil toneladas de estanho contido em reservas declaradas, distribuídas principalmente na região amazônica, especialmente nos estados de Rondônia e Amazonas, indicando significativa participação no contexto global desse minério (ANM, 2023). Em 2021, as reservas mundiais de estanho contido totalizavam 4,9 milhões de toneladas, com 8,9% dessas reservas localizadas em território brasileiro (U. S. Geological Survey, 2022).

Apesar disso, a extração de estanho causa significativos impactos ambientais, incluindo a supressão da vegetação nativa, o que resulta na interrupção dos ciclos biogeoquímicos e hidrológicos dos ecossistemas afetados. Essas atividades mineradoras podem levar à perda de biodiversidade, degradação do solo e contaminação dos corpos

d'água devido ao uso de produtos químicos e à liberação de sedimentos (Guan et al., 2020; Sonter et al., 2017).

4. ATIVIDADES DE MINERAÇÃO NA AMAZÔNIA

A região amazônica abriga uma significativa parcela das plantas e animais do mundo, representando aproximadamente um terço de todas as espécies conhecidas na Terra e desempenhando uma condição importante na regulação dos ciclos globais de carbono e água (Antonelli *et al.*, 2018; Meseguer *et al.*, 2020). Assim, a partir do século XX, os recursos minerais da Amazônia brasileira passaram a ser explorados de forma contínua, colocando o Brasil entre os principais produtores minerais do mundo, principalmente com extração de ferro, cobre, manganês, ouro, estanho, titânio e prata (Rudke et al., 2020; Siqueira-gay; Sonter; Sánchez, 2020; Szczesniak, 2017).

A mineração na Amazônia varia desde técnicas rudimentares, em pequena escala, até a mineração caracterizada por alta mecanização em escala industrial, incluindo a construção de portos e estradas (Lobo et al., 2018; Pereira, 2020). Em 2024, o Brasil registrou um total de exportação de bens minerais excedendo 87 milhões de toneladas no primeiro trimestre, equivalente a US\$ 10,9 bilhões, o que reforça a importante contribuição da atividade para a economia do país. Os principais produtos exportados incluíram minério de ferro, cobre, alumínio, manganês, caulim e ouro (IBRAM, 2024). Apesar da geração de emprego, renda, crescimento econômico e social nas cidades, também ocorre degradação do ambiente, pois 9% da floresta amazônica é perdida devido as consequências diretas e indiretas da exploração mineral (Barbosa *et al.*, 2022; Sonter *et al.*, 2017b).

5. RESTAURAÇÃO DE FLORESTAS RIPÁRIAS

As florestas ripárias são definidas como ecótonos entre os ambientes de terra firme e hídrico, sendo caracterizados por sua alta produtividade biológica e diversidade ecológica. A copa das árvores colabora para diminuição da temperatura, assim como a vegetação contribui com a ciclagem de nutrientes (Guo *et al.*, 2024; Sargac *et al.*, 2021; Turunen *et al.*, 2021). Além disso, esta vegetação atua no suporte à saúde biológica dos riachos, e evita impactos da erosão do solo, contribuindo para a filtragem de poluentes antes que eles alcancem os corpos d'água e fornecendo habitats para inúmeras espécies da flora e fauna (Campanhão, 2023; Cornejo-Denman *et al.*, 2018; González-Sargas *et al.*, 2024; Yirigui *et al.*, 2019). Esses

ecossistemas também são eficazes para o sequestro de carbono, devido principalmente ao alto acúmulo de biomassa e solo rico em matéria orgânica, tornando a restauração uma estratégia global e promissora. Esse investimento não só ajuda a mitigar as mudanças climáticas, como também apoia a preservação da biodiversidade e a sustentabilidade a longo prazo (Dybala *et al.*, 2019; Maracahipes-Santos *et al.*, 2023).

No entanto, devido a ações antrópicas como agricultura intensiva e atividades de mineração, esses ecossistemas têm sido constantemente degradados. Sendo assim, é necessário a implementação de métodos para avaliar e manejar as florestas ripárias na Amazônia, destacando a restauração da vegetação degradada, incluindo a remoção de espécies invasoras e a revegetação com plantas nativas adaptadas (Majumdar, 2023; Singh, Tiwari, 2021). No Brasil, essa questão é abordada por um extenso conjunto de normas instituídas no Código Florestal Federal, que estabelece diretrizes detalhadas para a proteção e uso sustentável dos recursos florestais. O Código Florestal, originalmente instituído em 1965 e reformulado pela Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, visa equilibrar a conservação ambiental com as necessidades de desenvolvimento econômico, definindo as áreas de preservação permanente, as reservas legais e os procedimentos para a recuperação de áreas degradadas (Brasil, 2012).

O plantio é o método mais recomendado para áreas onde houve descaracterização do solo e consequente eliminação das fontes naturais de propágulos (Martins *et al.*, 2020). Para selecionar espécies em ecossistemas ripários, é importante considerar características ecológicas como: I) adaptação à saturação hídrica, devido à influência das marés; II) presença de recursos atrativos para a fauna silvestre como flores, frutos e sementes; III) rápido crescimento em altura, diâmetro e área da copa, para cobrir o solo mais rapidamente, bem como é fundamental analisar a tolerância das espécies às condições adversas (Martins *et al.*, 2020).

O monitoramento é necessário para obter respostas da restauração no decorrer do tempo e observar a adaptação das espécies às condições edafoclimáticas específicas das áreas ripárias, como a qualidade do solo e a disponibilidade de nutrientes e água (Tabela 1). Além disso, em áreas afetadas pela mineração, onde o solo frequentemente apresenta alta quantidade de areia e baixa capacidade de troca catiônica, é indicado selecionar espécies com alto potencial para sobreviver e crescer nessas condições adversas. *Parkia pendula* é a espécie mais adequada para a restauração de ecossistemas de florestas ripárias degradadas pela

mineração de estanho na Amazônia central, assim como *Carapa guianensis* e palmeiras (Barbosa *et al.*, 2023; Halik *et al.*, 2019). Esse monitoramento contribui positivamente para a sucessão ecológica e dinâmica das comunidades florestais (Tabela 1).

Tabela 1 – Impactos da mineração de estanho em florestas ripárias e indicadores de monitoramento

Impacto ambiental	Indicador de monitoramento	Método sugerido
Supressão da vegetação	Cobertura vegetal, diversidade de espécies	Sensoriamento remoto, inventário florístico
Degradação do solo	Matéria orgânica, CTC, densidade, porosidade	Análise laboratorial de solo
Contaminação hídrica	Sedimentos, turbidez, metais pesados	Coleta e análise de água
Perda de funções ecológicas	Ciclagem de nutrientes, recrutamento de espécies	Serrapilheira, análise do solo, inventário florestal

Fonte: Adaptado de Gatica-Saavedra, Echeverría *et al.* (2017); Sonter *et al.* (2017); Guan *et al.* (2020); Londe *et al.* (2020); Fockink *et al.* (2022); Li *et al.* (2023); Barbosa *et al.* (2023).

O aumento das atividades antrópicas que ocasionam danos ao meio ambiente, sem considerar a sua sustentabilidade, possui como consequência a redução da capacidade dos ecossistemas em manter suas funções, resultando em uma degradação significativa. Esta situação tem impulsionado a implementação de medidas prioritárias voltadas para a recuperação e proteção da biodiversidade, visando restaurar a funcionalidade dos ambientes degradados (Dawson *et al.*, 2017). Portanto é fundamental que a atividade mineral tenha a sustentabilidade ambiental como uma prioridade para se alinhar à Agenda 2030 da ONU. Além disso, ao adotar práticas sustentáveis, as indústrias de mineração podem alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente aqueles voltados para a proteção do clima, conservação da biodiversidade e recuperação de áreas degradadas, como descrito no objetivo de número 15 (Adomako, 2022).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração dos indicadores ecológicos de composição, estrutura e função é essencial para o monitoramento da restauração de florestas ripárias degradadas pela mineração de estanho na Amazônia, pois permite avaliar a trajetória sucessional e a evolução dos ecossistemas de forma mensurável. A mineração de estanho ocasiona alterações sobre a vegetação, o solo e os recursos hídricos; contudo, a restauração com espécies nativas adaptadas às condições pós-mineração mostra-se uma estratégia viável. Nesse contexto, o monitoramento contínuo, aliado ao uso de sensoriamento remoto, é determinante para o sucesso dos projetos de restauração. A análise integrada desses indicadores aprimora a avaliação do processo na dinâmica da vegetação, enquanto a seleção de espécies nativas adequadas constitui fator-chave para o restabelecimento ecológico. Assim, a restauração de florestas ripárias representa não apenas uma exigência legal, mas uma estratégia essencial para conciliar conservação ambiental e uso sustentável na Amazônia.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Manejo de Ecossistemas e Bacias Hidrográficas (LABECOS), pelo apoio na realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal Rural da Amazônia, pela formação e suporte acadêmico.

REFERÊNCIAS

- ADOMAKO, S.; TRAN, M. D. Rough sets based Ordinal Priority Approach to evaluate sustainable development goals (SDGs) for sustainable mining. **Resources Policy**, v. 79, p. 103049, 2022.
- ANM. **Anuário Mineral Brasileiro 2022**. Brasília. Disponível em: <<https://in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mma-n-148-de-7-de-junho-de-2022-406272733>>. Acesso em: 29 set. 2025.
- ANM. **ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO PRINCIPAIS SUBSTÂNCIAS METÁLICAS 2022**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/PreviaAMB2022.pdf>>. Acesso em: 9 fev. 2026.
- ANTONELLI, A.; ZIZKA, A.; CARVALHO, F. A.; SCHARN, R.; BACON, C. D.; SILVESTRO, D.; CONDAMINE, F. L. Amazonia is the primary source of Neotropical biodiversity.

Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 115, n. 23, p. 6034–6039, 2018.

BARBOSA, R. DE S.; MATOS RODRIGUES, J. I. DE; OLIVEIRA, V. P. DE; MARTINS, W. B. R.; COELHO, C. A. C.; CARMO, W. F. S. DO; SANTOS, N. J. R. DOS; SOUSA, W. V. DE; SÃO PAULO AGUIAR, E. A. L. DE. Restoration of riparian ecosystems posterior to tin mining in the Central Amazon: Restoration indicators and selection of suitable species for planting. **Ecological Engineering**, v. 193, 2023.

BARBOSA, R. DE S.; VALE, R. S. DO; SCHWARTZ, G.; MARTINS, W. B. R.; RIBEIRO, S. S.; MATOS RODRIGUES, J. I. DE; FERREIRA, G. C.; BARBOSA, V. M. Restoration of degraded areas after bauxite mining in the eastern Amazon: Which method to apply? **Ecological Engineering**, v. 180, 2022.

CAMPANHÃO, L. M. B.; RANIERI, V. E. L. Influence of forest proportion and configuration at the watershed and riparian zone scales on sediment yield: a simulation experiment. **Landscape Ecology**, v. 38, n. 11, p. 2839–2860, 2023.

CORNEJO-DENMAN, L.; ROMO-LEON, J. R.; CASTELLANOS, A. E.; DIAZ-CARAVANTES, R. E.; MORENO-VÁZQUEZ, J. L.; MENDEZ-ESTRELLA, R. Assessing riparian vegetation condition and function in disturbed sites of the arid northwestern Mexico. **Land**, v. 7, 2018.

DAWSON, L.; ELBAKIDZE, M.; ANGELSTAM, P.; GORDON, J. Governance and management dynamics of landscape restoration at multiple scales: Learning from successful environmental managers in Sweden. **Journal of Environmental Management**, v. 197, p. 24–40, 2017.

DYBALA, K. E.; MATZEK, V.; GARDALI, T.; SEAVY, N. E. Carbon sequestration in riparian forests: A global synthesis and meta-analysis. **Global Change Biology**, v. 25, n. 1, p. 57–67, 2019.

EVANS, P. M.; NEWTON, A. C.; CANTARELLO, E.; SANDERSON, N.; JONES, D. L.; BARSOUM, N.; COTTRELL, J. E.; A'HARA, S. W.; FULLER, L. Testing the relative sensitivity of 102 ecological variables as indicators of woodland condition in the New Forest, UK. **Ecological Indicators**, v. 107, p. 105575, 2019.

FOCKINK, G. D.; ZANGALLI, C.; OLIVEIRA, E. DE; LUZ, M. DE S.; GOES, M. P. DE; SILVA, A. C. DA; FLORIANI, M. M. P.; NICOLETTI, M. F.; KANIESKI, M. R. Ecological indicators of passive restoration in South Brazil's Atlantic Forest areas with former *Pinus taeda* L. plantations. **Ecological Engineering**, v. 179, p. 106604, 2022.

GATICA-SAAVEDRA, P.; ECHEVERRÍA, C.; NELSON, C. R. Ecological indicators for assessing ecological success of forest restoration: a world review. **Restoration Ecology**, v. 25, n. 6, p. 850–857, 2017.

- GONZÁLEZ-SARGAS, E.; MEEHAN, T. D.; HINOJOSA-HUERTA, O.; VILLAGOMEZ-PALMA, S.; CALVO-FONSECA, A.; DODGE, C.; GÓMEZ-SAPIENS, M.; SHAFROTH, P. B. Bird community response to one decade of riparian restoration along the Colorado River delta in Mexico. **Ecological Engineering**, v. 205, p. 107291, 2024.
- GUAN, Y.; ZHOU, W.; BAI, Z.; CAO, Y.; HUANG, Y.; HUANG, H. Soil nutrient variations among different land use types after reclamation in the Pingshuo opencast coal mine on the Loess Plateau, China. **CATENA**, v. 188, p. 104427, 2020.
- GUIMARAES, A. F.; SOUZA, C. R. DE; ROSA, C.; PAULO DOS SANTOS, J.; TEIXEIRA, L. A. F.; ZANZINI, L. P.; SANTIAGO, W. T. V.; ZANZINI, A. C. DA S. Small-scale environmental variations drive vegetation structure and diversity in Amazon riverine forests. **Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, v. 283, 2021.
- GUO, M.; XUE, W. L.; WANG, C.; LI, W. Z.; GAO, H.; SAINTILAN, N.; LI, C. L.; HUANG, G.; WANG, Y. Y. Environmental Flow Increases The Riparian Vegetation Diversity And Community Similarity. **Wetlands**, v. 44, n. 5, 2024.
- HALIK, Ü.; AISHAN, T.; BETZ, F.; KURBAN, A.; ROUZI, A. Effectiveness and challenges of ecological engineering for desert riparian forest restoration along China's largest inland river. **Ecological Engineering**, v. 127, p. 11–22, 2019.
- HAUTIER, Y. *et al.* Local loss and spatial homogenization of plant diversity reduce ecosystem multifunctionality. **Nature Ecology & Evolution** **2017 2:1**, v. 2, n. 1, p. 50–56, 2017.
- IBRAM. **Setor Mineral 1º trimestre 2024** . Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2024/05/Dados-setor-mineral-1tri_2024-1.pdf?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 9 fev. 2026.
- INGULSTAD, MATS.; PERCHARD, ANDREW.; STORLI, ESPEN. A history of the devil's metal, 1850-2000. **Tin and Global Capitalism**, p. 5–24, 2017.
- LI, M.; ZUO, S.; SU, Y.; ZHENG, X.; WANG, W.; CHEN, K.; REN, Y. An Approach Integrating Multi-Source Data with LandTrendr Algorithm for Refining Forest Recovery Detection. **Remote Sensing**, v. 15, n. 10, p. 2667, 2023.
- LOBO, F. DE L.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; NOVO, E. M. L. DE M.; CARLOS, F. M.; BARBOSA, C. C. F. Mapping mining areas in the Brazilian amazon using MSI/Sentinel-2 imagery (2017). **Remote Sensing**, v. 10, n. 8, 2018.
- LONDE, V.; TURINI FARAH, F.; RIBEIRO RODRIGUES, R.; ROBERTO MARTINS, F. Reference and comparison values for ecological indicators in assessing restoration areas in the Atlantic Forest. **Ecological Indicators**, v. 110, p. 105928, 2020.
- MAJUMDAR, A.; AVISHEK, K. Riparian Zone Assessment and Management: an Integrated Review Using Geospatial Technology. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 234, n. 5, 2023.

- MARACAHIPES-SANTOS, L.; SILVÉRIO, D. V.; MACEDO, M. N.; MARACAHIPES, L.; JANKOWSKI, K. J.; PAOLUCCI, L. N.; NEILL, C.; BRANDO, P. M. Agricultural land-use change alters the structure and diversity of Amazon riparian forests. **Biological Conservation**, v. 252, 2020.
- MARACAHIPES-SANTOS, L.; SILVÉRIO, D. V.; MARACAHIPES, L.; MACEDO, M. N.; LENZA, E.; JANKOWSKI, K. J.; WONG, M. Y.; SILVA, A. C. S. DA; NEILL, C.; DURIGAN, G.; BRANDO, P. M. Intraspecific trait variability facilitates tree species persistence along riparian forest edges in Southern Amazonia. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, 2023.
- MARTINS, W. B. R. D. R. L. M.; OLIVEIRA BARROS JUNIOR, U. DE; SOUSA VILLAS-BOAS AMORIM, L.; ASSIS OLIVEIRA, F. DE; SCHWARTZ, G. Ecological methods and indicators for recovering and monitoring ecosystems after mining: A global literature review. **Ecological Engineering**, v. 145, p. 105707, 2020.
- MESEGUER, A. S.; ANTOINE, P. O.; FOUQUET, A.; DELSUC, F.; CONDAMINE, F. L. The role of the Neotropics as a source of world tetrapod biodiversity. **Global Ecology and Biogeography**, v. 29, n. 9, p. 1565–1578, 2020.
- OSOVIĆ, M. C.; BUGALHO, M. N.; THOM, D.; BORGES, J. G. Stand Structural Characteristics Are the Most Practical Biodiversity Indicators for Forest Management Planning in Europe. **Forests**, v. 11, n. 3, p. 343, 2020.
- PEREIRA, W. V. DA S. Fracionamento químico e bioacessibilidade de elementos potencialmente tóxicos em área de mineração artesanal de ouro na Amazônia. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal Rural da Amazônia, 2020.
- PHILIPSON, C. D. *et al.* Active restoration accelerates the carbon recovery of human-modified tropical forests. **Science**, v. 369, n. 6505, p. 838–841, 2020.
- PRESIDENTA DA REPÚBLICA. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm>. Acesso em: 9 fev. 2026.
- RODRIGUES, D. S. **ESTANHO**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudos/anm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-estanho>>. Acesso em: 9 fev. 2026.
- ROGOFF, M. J. Solid Waste Recycling and Processing: Planning of Solid Waste Recycling Facilities and Programs: Second Edition. **Solid Waste Recycling and Processing: Planning of Solid Waste Recycling Facilities and Programs: Second Edition**, p. 1–244, 2013.
- RUDKE, A. P.; SIKORA DE SOUZA, V. A.; SANTOS, A. M. DOS; FREITAS XAVIER, A. C.; ROTUNNO FILHO, O. C.; MARTINS, J. A. Impact of mining activities on areas of environmental protection in the southwest of the Amazon: A GIS- and remote sensing-based assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 263, 2020.

- SAHU, V. K.; DAS, A. K.; AJIMSHA, R. S.; BHARTIYA, S.; SINGH, R.; DESHPANDE, U.; RAI, S. K.; MISRA, P. Investigations on RF sputtered TiN thin films and Cu/TiO₂/TiN devices for resistive switching memory applications. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 34, n. 26, p. 1–19, 2023.
- SARGAC, J.; JOHNSON, R. K.; BURDON, F. J.; TRUCHY, A.; RÎȘNOVEANU, G.; GOETHALS, P.; MCKIE, B. G. Forested riparian buffers change the taxonomic and functional composition of stream invertebrate communities in agricultural catchments. **Water (Switzerland)**, v. 13, n. 8, 2021.
- SINGH, R.; TIWARI, A. K.; SINGH, G. S. Managing riparian zones for river health improvement: an integrated approach. **Landscape and Ecological Engineering**, v. 17, n. 2, p. 195–223, 2021.
- SIQUEIRA-GAY, J.; SONTER, L. J.; SÁNCHEZ, L. E. Exploring potential impacts of mining on forest loss and fragmentation within a biodiverse region of Brazil's northeastern Amazon. **Resources Policy**, v. 67, p. 101662, 2020.
- SONTER, L. J.; HERRERA, D.; BARRETT, D. J.; GALFORD, G. L.; MORAN, C. J.; SOARES-FILHO, B. S. Mining drives extensive deforestation in the Brazilian Amazon. **Nature Communications**, v. 8, n. 1, 2017.
- SZCZESNIAK, P. A. The mineral industry of Brazil: government policies and programs. **Minerals Yearbook**, v. 74, p. 12, 2017.
- TRUCHY, A.; SPONSELLER, R. A.; ECKE, F.; ANGELER, D. G.; KAHLERT, M.; BUNDSCHUH, M.; JOHNSON, R. K.; MCKIE, B. G. Responses of multiple structural and functional indicators along three contrasting disturbance gradients. **Ecological Indicators**, v. 135, p. 108514, 2022.
- TURUNEN, J.; ELBRECHT, V.; STEINKE, D.; AROVITA, J. Riparian forests can mitigate warming and ecological degradation of agricultural headwater streams. **Freshwater Biology**, v. 66, n. 4, p. 785–798, 2021.
- U. S. GEOLOGICAL SURVEY. MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2022. p. 1–206, 2022.
- VALBUENA, R. *et al.* Standardizing Ecosystem Morphological Traits from 3D Information Sources. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 35, n. 8, p. 656–667, 2020.
- YIRIGUI, Y.; LEE, S. W.; NEJADHASHEMI, A. P.; HERMAN, M. R.; LEE, J. W. Relationships between riparian forest fragmentation and biological indicators of streams. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 10, 2019.
- ŽIBRET, G.; GOSAR, M.; MILER, M.; ALIJAGIĆ, J. Impacts of mining and smelting activities on environment and landscape degradation—Slovenian case studies. **Land Degradation and Development**, v. 29, n. 12, p. 4457–4470, 2018.

CAPÍTULO XX

BIOSSURFACTANTES MICROBIANOS NA REMEDIAÇÃO AMBIENTAL DE CONTAMINANTES PETROLÍFEROS: UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL

MICROBIAL BIOSURFACTANTS IN THE ENVIRONMENTAL REMEDIATION OF PETROLEUM CONTAMINANTS: A SUSTAINABLE APPROACH

DOI: 10.51859/amplla.mac6200-20

Emília Mendes da Silva Santos¹

Hozana de Souza Ferreira²

Yali Alves da Silva³

Antônio Pedro da Costa Albuquerque⁴

Juliana Moura de Luna⁵

¹ Farmacêutica. Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais. Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7566-0079>

² Bióloga. Doutoranda em Biotecnologia. Rede Nordeste de Biotecnologia - Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8111-2738>

³ Bióloga. Doutoranda em Biotecnologia. Rede Nordeste de Biotecnologia - Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0708-7589>

⁴ Graduando do curso de Bacharelado em Ciências Biológicas. Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3475-7824>

⁵ Professora da Escola de Saúde e Ciências da Vida. Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4619-6857>

RESUMO

A contaminação ambiental por petróleo e seus derivados representa um importante problema ecológico, exigindo o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para a recuperação de áreas impactadas. Nesse contexto, os biossurfactantes têm se destacado como alternativas promissoras aos surfactantes químicos convencionais devido à sua biodegradabilidade, baixa toxicidade e elevada eficiência na redução da tensão superficial e interfacial. Esta revisão narrativa teve como objetivo apresentar uma visão geral sobre as principais características dos biossurfactantes, seus microrganismos produtores e suas aplicações ambientais. Foram abordados aspectos relacionados à classificação desses compostos, às principais espécies microbianas produtoras e aos mecanismos que favorecem a solubilização e a biodisponibilidade dos hidrocarbonetos. A literatura analisada demonstra que os biossurfactantes desempenham papel relevante na potencialização dos processos de

biodegradação, contribuindo para o aumento da eficiência da biorremediação. Além disso, destacam-se aplicações relacionadas à limpeza de reservatórios de petróleo e à dispersão de manchas de óleo em ambientes aquáticos. Apesar dos avanços científicos e tecnológicos observados nos últimos anos, desafios associados à produção em larga escala e à viabilidade econômica ainda limitam sua aplicação comercial. Entretanto, os biossurfactantes representam uma alternativa sustentável e ambientalmente segura para a mitigação dos impactos causados pela contaminação por petróleo e derivados, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias alinhadas aos princípios da sustentabilidade e da preservação ambiental.

Palavras-chave: Biossurfactantes. Biorremediação. Contaminação por petróleo. Biodegradação. Sustentabilidade ambiental.

ABSTRACT

Environmental contamination by petroleum and its derivatives represents a major ecological problem, requiring the development of sustainable technologies for the recovery of impacted areas. In this context, biosurfactants have emerged as promising alternatives to conventional chemical surfactants due to their biodegradability, low toxicity, and high efficiency in reducing surface and interfacial tension. This narrative review aimed to provide an overview of the main characteristics of biosurfactants, their producing microorganisms, and their environmental applications. Aspects related to the classification of these compounds, the main microbial species involved in their production, and the mechanisms that promote hydrocarbon solubilization and bioavailability were addressed. The analyzed literature demonstrates that biosurfactants play an important role in

enhancing biodegradation processes, contributing to increased bioremediation efficiency. In addition, applications related to the cleaning of petroleum reservoirs and the dispersion of oil spills in aquatic environments are highlighted. Despite the scientific and technological advances achieved in recent years, challenges associated with large-scale production and economic feasibility still limit their commercial application. Nevertheless, biosurfactants represent a sustainable and environmentally safe alternative for mitigating the impacts caused by petroleum and petroleum-derived contamination, contributing to the development of technologies aligned with the principles of sustainability and environmental conservation.

Keywords: Biosurfactants. Bioremediation. Petroleum Contamination. Biodegradation. Environmental Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

Com os avanços tecnológicos observados nas últimas décadas, as refinarias de petróleo ampliaram significativamente a produção de hidrocarbonetos e seus derivados. Entretanto, devido à intensa utilização dessas matérias-primas como fontes de energia para o desenvolvimento econômico e industrial, também ocorre a geração expressiva de resíduos petrolíferos provenientes de atividades de transporte, perfuração, processamento e derramamentos acidentais. Esses resíduos podem provocar sérios impactos ambientais, comprometendo ecossistemas terrestres e aquáticos, além de afetarem a biodiversidade e a qualidade dos recursos naturais (Sattar *et al.*, 2022; Arghiropol *et al.*, 2025).

As refinarias são grandes geradoras de poluição, pois consomem enormes quantidades de água e de energia, produzem elevados volumes de rejeitos líquidos, liberam diversos gases poluentes para a atmosfera e geram resíduos sólidos de difícil tratamento e disposição. Em decorrência desses fatores, a indústria de refino de petróleo é considerada uma importante degradadora do meio ambiente, uma vez que possui potencial para afetar diretamente os diferentes compartimentos da biosfera, incluindo ar, água e solo (Melikoglu, 2026; Wojtowicz *et al.*, 2025).

Diante dessa realidade, a possibilidade de contaminação ambiental é real e iminente, havendo necessidade urgente do desenvolvimento de novas tecnologias que possam conter possíveis contaminações (Singh *et al.*, 2024; Oliveira *et al.*, 2025). A contaminação por

petróleo e derivados, incluindo os metais pesados, normalmente é tratada através de metodologias físicas, químicas ou biológicas. Entretanto, as novas diretrizes de recuperação de águas e solos têm restringido a utilização de produtos químicos (Beretta *et al.*, 2026; Shahzad *et al.*, 2024).

Dentre as técnicas disponíveis para o tratamento de petroderivados, a biorremediação tem se destacado entre as principais tecnologias empregadas na descontaminação de solos e águas contaminadas. Isso se deve ao fato de ser considerada uma ferramenta de gerenciamento econômica e ecoeficiente, fundamentada em processos naturais, menos agressivos ao meio ambiente e mais adequados à manutenção do equilíbrio ecológico, além de apresentar menor custo quando comparada às alternativas físicas e físico-químicas convencionais (Melikoglu, 2026).

Nesse contexto, a utilização de compostos eco-friendly, como os biossurfactantes, surge como uma alternativa sustentável aos surfactantes químicos convencionais, devido às suas características ambientalmente favoráveis. Esses compostos podem ser produzidos por microrganismos a partir de matérias-primas renováveis, apresentam ampla diversidade química, elevada compatibilidade ambiental e versatilidade de aplicações industriais e ambientais (Sharma; Lavania; Lal, 2023; Ahluwalia *et al.*, 2025). Os biossurfactantes são considerados importantes produtos biotecnológicos em razão de sua elevada biodegradabilidade, baixa toxicidade e eficiência mesmo em baixas concentrações, quando comparados aos surfactantes químicos convencionais. Além disso, esses compostos anfífilos de baixo peso molecular, produzidos por diferentes microrganismos, desempenham papel relevante em processos de biorremediação, favorecendo o aumento da biodisponibilidade de compostos hidrofóbicos (Mishra; Trivedi, 2026).

Dessa forma, os biossurfactantes apresentam-se como alternativas promissoras para potencializar os processos de biorremediação de ambientes contaminados por petróleo e seus derivados, uma vez que favorecem a solubilização e a biodisponibilidade dos hidrocarbonetos, contribuindo para a degradação microbiana desses poluentes. Além disso, destacam-se por sua biodegradabilidade, baixa toxicidade e compatibilidade ambiental, características que reforçam seu potencial de aplicação em tecnologias sustentáveis voltadas à recuperação de áreas degradadas (Kumari; Singha; Shukla, 2023). Nesse sentido, esta revisão narrativa visa fornecer uma visão geral acerca das principais aplicabilidades ambientais dos

biossurfactantes, com ênfase em sua utilização na biorremediação de solos e águas contaminados por compostos petrolíferos.

2. BIOSSURFACTANTES

Os biossurfactantes são compostos de origem microbiana produzidos principalmente por bactérias e leveduras. Estes compostos são formados por estruturas moleculares com uma porção hidrofílica e outra hidrofóbica porção esta que tendem a particionar nas interfaces entre as fases líquidas com diferentes graus de polaridade (óleo/água e água/óleo), promovendo uma redução nas tensões superficiais e interfaciais, que confere a capacidade de detergência, emulsificação, lubrificação, solubilização e dispersão de fases (Hsu *et al.*, 2025; Garg *et al.*, 2025).

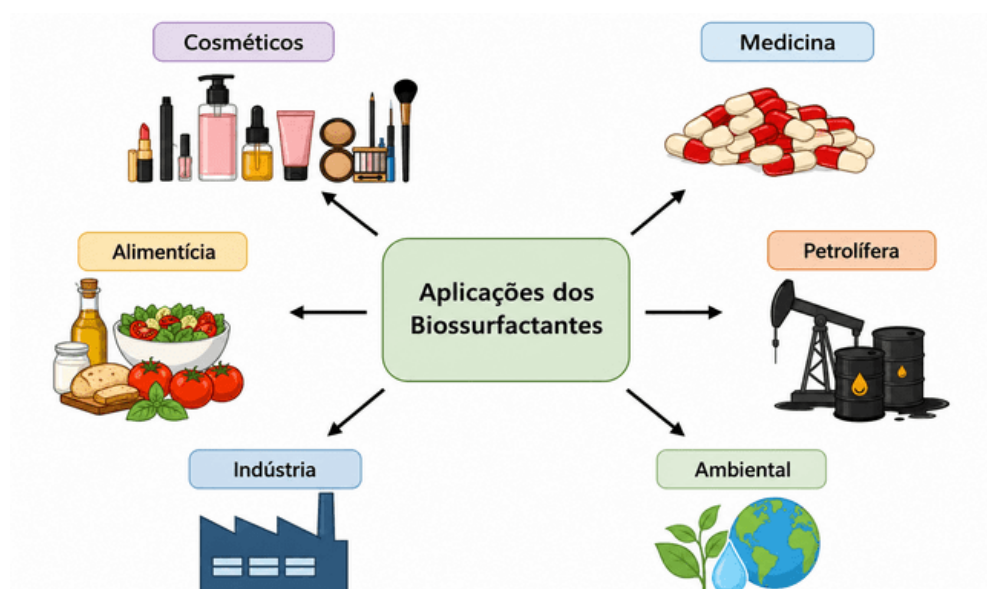
Segundo Vega e Stampino (2025), a grande maioria dos surfactantes disponíveis comercialmente é sintetizada a partir de derivados de petróleo. No entanto, vários compostos com propriedades tensoativas são produzidos por alguns organismos vivos como plantas (saponinas), mas principalmente por microrganismos como bactérias, fungos e leveduras (glicolípideos), este surfactante natural, biodegradável obtido de micro-organismos pode ser uma alternativa atraente em relação aos surfactantes sintéticos (Vega; Stampino, 2025; Garg *et al.*, 2025).

Nos últimos anos, esses compostos de origem microbiana têm despertado o interesse da comunidade científica em encontrar alternativas aos surfactantes sintéticos. O motivo para esta notoriedade está relacionado às suas propriedades como diversidade estruturais, baixa toxicidade, biodegradabilidade, capacidade de ação em ambientes extremos, (pH, temperatura e salinidade), seletividade, redução da tensão superficial e a capacidade de ser produzidos a partir de fontes renováveis, resíduos e subprodutos com ampla gama de aplicações industriais (Silva *et al.*, 2025; Heldin; Hossam, 2023).

Essas características ampliam seu potencial de aplicação em diversos setores industriais, incluindo as indústrias farmacêutica, cosmética, alimentícia, petrolífera e ambiental, conforme apresentado na figura 1 (Sani *et al.*, 2024; Carolin; Kamalesh, 2024).

Dessa forma, estudos recentes têm buscado alternativas para otimizar a produção e aumentar a viabilidade econômica desses compostos, incluindo o uso de substratos de baixo custo, melhoramento de cepas microbianas e aplicação de técnicas biotecnológicas para elevar a produtividade (Elmogy *et al.*, 2026; Angba *et al.*, 2025). Assim, os biossurfactantes

vêm sendo considerados alternativas promissoras aos surfactantes sintéticos, especialmente diante da crescente demanda por tecnologias sustentáveis e processos ambientalmente seguros. Essa tendência está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), com destaque para o ODS 6 (Água potável e saneamento), relacionado à preservação e recuperação de recursos hídricos; o ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), voltado ao desenvolvimento de tecnologias sustentáveis; o ODS 12 (Consumo e produção responsáveis), associado à redução de impactos ambientais e ao uso racional de recursos; e o ODS 14 (Vida na água) e ODS 15 (Vida terrestre), que contemplam a proteção de ecossistemas aquáticos e terrestres frente à contaminação por derivados de petróleo (Tendenedzai; Chirwa; Brink, 2026; Elayaperumal *et al.*, 2025).



Fonte: Elaborado pela autora, com base em Carolin e Kamalesh (2024).

2.1. CLASSIFICAÇÃO DOS BIOSSURFACTANTES

Os biossurfactantes podem ser classificados em aniônicos, catiônicos, neutros ou anfotéricos, de acordo com a natureza da porção polar e a presença ou ausência de cargas elétricas em sua estrutura (Lavanya; Machado, 2024). Entre os biossurfactantes, predominam os compostos de caráter aniônico ou neutro, enquanto aqueles que apresentam grupos amina são geralmente classificados como catiônicos. Essas biomoléculas possuem estrutura anfifílica, formada por uma região hidrofóbica, normalmente constituída por ácidos graxos de cadeia longa, e uma região hidrofílica, que pode conter carboidratos, peptídeos cíclicos, aminoácidos, grupos fosfato, ácidos carboxílicos ou álcoois (Hsu *et al.*, 2025).

Além da classificação baseada na carga elétrica e composição química, os biossurfactantes também podem ser agrupados de acordo com sua massa molecular (Datta *et al.*, 2024). Os compostos de baixa massa molecular, como glicolipídios e lipopeptídeos, destacam-se pela elevada capacidade de reduzir as tensões superficial e interfacial, característica importante em processos de emulsificação, solubilização e dispersão. Em contrapartida, biossurfactantes e bioemulsificantes de alta massa molecular apresentam maior eficiência na estabilização de emulsões, embora tenham menor capacidade de redução da tensão superficial. Essa diversidade estrutural e funcional amplia significativamente o potencial de aplicação dos biossurfactantes em diferentes setores industriais e ambientais (Bustos-Vázquez *et al.*, 2025; Lourenço; Duarte; Ribeiro, 2024).

2.2. MICRORGANISMOS PRODUTORES

Diversos microrganismos, incluindo bactérias, leveduras e fungos filamentosos, são capazes de produzir biossurfactantes com diferentes estruturas e propriedades (Singh *et al.*, 2024). Entre os principais gêneros estudados destacam-se *Bacillus*, *Pseudomonas* e *Candida* (Tabela 1). A produção desses compostos varia conforme o substrato utilizado, podendo alterar propriedades como atividade emulsificante e redução da tensão superficial, favorecendo aplicações específicas (Miao *et al.*, 2024; Fernandes; Simões; Dias, 2023).

Tabela 1 – Diversidade microbiana na produção de biossurfactantes e suas classificações químicas

Microrganismos	Biossurfactante produzido	Classe	Referências
<i>Bacillus subtilis</i>	Surfactina	Lipopeptídeo	Qi <i>et al.</i> (2023)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Ramnolipídeos	Glicolipídeo	Lavanya (2024)
<i>Starmerella bombicola</i>	Soforolipídeos	Glicolipídeo	Dhadwal <i>et al.</i> (2024)
<i>Yarrowia lipolytica</i> (<i>Candida lipolytica</i>)	Liposan	Bioemulsificante polimérico	Bauer <i>et al.</i> (2022)
<i>Moesziomyces antarcticus</i> (<i>Candida antarctica</i>)	Manosileritritol lipídios (MELs)	Glicolipídeo	Krauss <i>et al.</i> (2024)
<i>Aspergillus niger</i>	Ácido glucônico	Glicolipídeo	Fernandes <i>et al.</i> (2024)
<i>Rhodococcus ALDO1</i>	Glicolipídeo	Glicolipídeo	Negrete <i>et al.</i> 2024

Fonte: Autoria própria.

Conforme observado na Tabela 1, os micro-organismos descritos produzem biossurfactantes pertencentes à classe dos glicolipídeos. Esses compostos apresentam

estrutura anfifílica, formada por uma porção hidrofílica associada a cadeias lipídicas, característica responsável por sua elevada capacidade de reduzir a tensão superficial e interfacial, além de favorecer processos de emulsificação e formação micelar. Devido às suas propriedades físico-químicas e biológicas, os glicolipídeos vêm despertando grande interesse biotecnológico, especialmente pelo potencial de aplicação nas áreas ambiental, farmacêutica, cosmética e biomédica (Dini *et al.*, 2024; Lourenço; Duarte; Ribeiro, 2024).

3. APLICAÇÃO DE BIOSSURFACTANTES NA BIORREMEDIAÇÃO

Os derramamentos de petróleo representam uma importante fonte de contaminação ambiental, causando impactos significativos sobre ecossistemas marinhos e terrestres devido à elevada toxicidade dos hidrocarbonetos presentes no petróleo. Esses compostos podem comprometer a fauna, a flora e a microbiota natural, além de provocar alterações físico-químicas no solo e na água, afetando diretamente a biodiversidade e o equilíbrio ecológico (Zhang; Chen; Gong, 2024). Diante disso, diferentes estratégias físicas, químicas e biológicas vêm sendo empregadas para minimizar os danos causados por esses contaminantes, incluindo processos de contenção, dispersão química e degradação biológica de compostos petrolíferos (Shi *et al.*, 2022; Mekonnen; Aragaw; Genet, 2024).

Entre as alternativas biotecnológicas utilizadas no tratamento de áreas contaminadas, destaca-se a biorremediação, processo que utiliza microrganismos capazes de degradar contaminantes e convertê-los em substâncias menos tóxicas ou menos persistentes no ambiente. A eficiência desse método depende diretamente da atividade metabólica microbiana, podendo ser intensificada por técnicas de bioestimulação, que promovem o crescimento dos microrganismos já presentes no ambiente contaminado, ou por bioaugmentação, baseada na introdução de linhagens degradadoras específicas (Aragaw, 2021; Singha; Pandey, 2021). Um dos exemplos mais marcantes da aplicação dessa tecnologia ocorreu após o derramamento de petróleo do navio Exxon Valdez, no Alasca, considerado um dos maiores desastres ambientais envolvendo petróleo (Bragg *et al.*, 1994). Nesse contexto, os biossurfactantes surgem como compostos promissores por aumentarem a biodisponibilidade dos hidrocarbonetos através da redução da tensão superficial e interfacial, favorecendo a solubilização de substâncias hidrofóbicas e facilitando sua assimilação pelos

microrganismos degradadores, o que contribui para processos de biodegradação mais eficientes e sustentáveis (Sah *et al.*, 2022; Abis; Hassan; Hassan, 2025).

3.1. APLICAÇÃO DE BIOSSURFACTANTES NA LIMPEZA DE RESERVATÓRIOS DE ÓLEOS

As aplicações industriais mais comuns para biossurfactantes estão relacionadas ao petróleo e indústrias de mineração, bem como processos de limpeza industrial (Faccioli *et al.*, 2024).

Grandes quantidades de petróleo bruto são movimentadas diariamente, distribuídas para as refinarias e colocadas em tanques de armazenamento. A manutenção destes tanques, entretanto, requer lavagem periódica (Hasan *et al.*, 2025). No entanto, resíduos e frações de óleos pesados que se acumulam na parte inferior e nas paredes dos tanques de armazenamento são altamente viscosos e tornam-se depósitos sólidos que não podem ser removidos com bombeamento convencional (Wang *et al.*, 2026). A remoção desses resíduos requer lavagem com solventes e limpeza manual, tornando-se uma tarefa perigosa, demorada e com custos elevados, resultando na produção de grandes quantidades de material residual para eliminação (Mobin *et al.*, 2024).

A utilização de biossurfactantes para a limpeza de tanques de armazenamento de óleo é um procedimento alternativo para diminuição da viscosidade através da formação de emulsões óleo-em-água facilitando o bombeamento de resíduos. Além disso, este processo permite a recuperação do óleo cru após a quebra da emulsão (Al-Sakkaf; Onaizi, 2024).

3.2. APLICAÇÃO DE BIOSSURFACTANTES NA DISPERSÃO DE MANCHAS DE PETRÓLEO

Os derramamentos de petróleo decorrentes do transporte de óleo e da instalação de oleodutos representam uma das principais causas de impactos ambientais em regiões costeiras e marinhas, provocando danos ecológicos e socioeconômicos significativos (Wood *et al.*, 2025). Entre as estratégias utilizadas para minimizar esses impactos, destaca-se a aplicação de dispersantes, compostos formados por surfactantes, solventes e aditivos capazes de aumentar a dispersão do petróleo na água. Esse processo promove a fragmentação do óleo em pequenas gotículas, reduzindo sua permanência na superfície e diminuindo os danos causados à fauna marinha, especialmente aves e mamíferos aquáticos, além de proteger áreas costeiras sensíveis.

Além de favorecer a remoção do petróleo da superfície contaminada, a dispersão do óleo aumenta sua área superficial e facilita sua biodegradação por microrganismos naturais presentes no ambiente (Melikoglu, 2026). Nesse contexto, os biossurfactantes vêm sendo investigados como alternativas promissoras aos dispersantes químicos convencionais, devido à sua capacidade de atuar como agentes dispersantes mais sustentáveis e biodegradáveis (Jeong *et al.*, 2026). Embora diversos estudos demonstrem o potencial desses compostos em aumentar a dispersão e biodegradação de hidrocarbonetos, ainda são relativamente limitadas as aplicações práticas envolvendo biossurfactantes em grandes derramamentos de petróleo (Okezie *et al.*, 2026).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os biossurfactantes apresentam grande potencial na biorremediação de ambientes contaminados por petróleo e seus derivados, uma vez que favorecem a solubilização e a biodisponibilidade dos hidrocarbonetos, contribuindo para a degradação microbiana desses poluentes. Além disso, destacam-se por serem biodegradáveis, pouco tóxicos e ambientalmente sustentáveis. Apesar dos desafios relacionados à produção em larga escala, esses compostos representam uma alternativa promissora para o desenvolvimento de tecnologias mais limpas e ecológicas na recuperação de áreas contaminadas, contribuindo significativamente para a mitigação dos impactos ambientais causados por esses contaminantes.

REFERÊNCIAS

- ABIS, L. A.; HASSAN, O. M.; HASSAN, K. T. **Biosurfactants in the remediation of petroleum-contaminated soils: Mechanisms and applications**. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, v. 26, n. 11, p. 375–388, 1 nov. 2025. DOI: <https://doi.org/10.12912/27197050/211804>
- AHLUWALIA, O. *et al.* **Prospects and challenges regarding biosurfactants in petroleum applications**. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, v. 13, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1697361>
- AL-SAKKAF, M. K.; ONAIZI, S. A. **Effects of emulsification factors on the characteristics of crude oil emulsions stabilized by chemical and Biosurfactants: A review**. *Fuel*, v. 361, p. 130604–130604, 1 abr. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130604>

- ANGBA, Y. J. *et al.* **Optimization of biosurfactant production by *Pseudomonas aeruginosa* strain Pa using rubber tree seed oil as sole carbon source.** Discover Applied Sciences, v. 7, n. 1020, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07531-y>
- ARAGAW, T. A. **Functions of various bacteria for specific pollutants degradation and their application in wastewater treatment: a review.** International Journal of Environmental Science and Technology, v. 18, n. 7, p. 2063–2076, 13 nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-020-03022-2>
- ARGHIROPOL, D. *et al.* **Petroleum hydrocarbon pollution and sustainable uses of remediation materials.** Sustainability, v. 17, n. 17, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17178018>
- BAUER, C. M. *et al.* **Biosynthesis of fatty acids and biosurfactants by the yeast *Yarrowia lipolytica* with emphasis on metabolic networks and bioinformatics.** Biotechnology Research and Innovation, v. 6, n. 1, p. e2022001, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/biori.202201>
- BERETTA, G. *et al.* **Biosurfactants and bioemulsifiers for soil remediation as a green solution from waste.** Reviews in Environmental Science and Biotechnology, v. 25, p. 16, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11157-025-09761-3>.
- BRAGG, J. R. *et al.* **Effectiveness of bioremediation for the Exxon Valdez oil spill.** Nature, v. 368, n. 6470, p. 413–418, mar. 1994. DOI: <https://doi.org/10.1038/368413a0>
- BUSTOS-VÁZQUEZ, M. G. *et al.* **Recent Advances in Biosurfactant Production in Solid-State Fermentation.** Fermentation, v. 11, n. 10, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation11100592>
- CAROLIN, F.; KAMALESH, T. **Advances in stabilization of metallic nanoparticle with biosurfactants: a review on current trends.** Heliyon, v. 10, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29773>.
- DATTA, D. *et al.* **Microbial biosurfactants: Multifarious applications in sustainable agriculture.** Microbiological Research, v. 279, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127551>
- DHADWAL, S. *et al.* **Sophorolipid: An Effective Biomolecule for Targeting Microbial Biofilms.** Current Microbiology, v. 81, n. 11, 4 out. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00284-024-03892-6>
- DINI, S. *et al.* **The physicochemical and functional properties of biosurfactants: a review.** Molecules, v. 29, n. 11, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules29112544>
- ELAYAPERUMAL, S. *et al.* **Eco-friendly biosurfactant solutions for petroleum hydrocarbon cleanup in aquatic ecosystems.** Sustainable Chemistry for the Environment, v. 9, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2025.100207>

- ELMOGY, S. M. *et al.* **Low-cost biosurfactant production by *Achromobacter xylosoxidans* PX106473 from waste frying oil: partial characterization and antimicrobial mechanism via molecular docking.** *Microbial Cell Factories*, v. 25, n. 23, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12934-025-02906-7>
- FACCIOLI, Y. E. da S. *et al.* **Biosurfactants: Chemical Properties, Ecofriendly Environmental Applications, and Uses in the Industrial Energy Sector.** *Energies*, v. 17, n. 20, p. 5042, 10 out. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17205042>
- FERNANDES, N. DE A. T.; SIMÕES, L. A.; DIAS, D. R. **Biosurfactants Produced by Yeasts: Fermentation, Screening, Recovery, Purification, Characterization, and Applications.** *Fermentation*, v. 9, n. 3, p. 207, 22 fev. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation9030207>
- FERNANDES, S. *et al.* **Soybean molasses as a new and low-cost substrate for gluconic acid production by *Aspergillus niger*.** *Process Biochemistry*, v. 146, p. 241–249, 24 jul. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2024.07.034>
- CAROLIN C, F.; KAMALESH, T. **Advances in stabilization of metallic nanoparticle with biosurfactants- A review on current trends.** *Heliyon*, v. 10, n. 9, p. e29773–e29773, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29773>
- GARG, R. *et al.* **Comprehensive review of the synthesis and sustainable applications of biosurfactants.** *Discover Applied Sciences*, v. 7, n. 1168, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07603-z>
- HASAN, A. M. A. *et al.* **Environmental impacts for the transportation of crude oil and refined products.** *Environmental Science and Pollution Research*, 14 jul. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36574-2>
- HELDIN, A. M.; HOSSAN, N. **Microbial surfactants: characteristics, production and broader application prospects in environment and industry.** *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, v. 53, n. 9, p. 1013-1042, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/10826068.2023.2175364>
- HSU, C. Y. *et al.* **Biosurfactants: properties, applications and emerging trends.** *South African Journal of Chemical Engineering*, v. 53, P. 21-39, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2025.04.002>
- JEONG, G.-J. *et al.* **Promising biosurfactant derived from *Bacillus velezensis* DG5714: A sustainable alternative to synthetic surfactants.** *Journal of Environmental Sciences*, jan. 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2026.01.028>
- KRAUSS, I. R. *et al.* **From composite molecular structures to a multiplicity of supramolecular aggregates: the role of intermolecular interactions in biosurfactant self-assembly.** *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, v. 70, p. 101792–101792, 1 abr. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2024.101792>

- KUMARI, R.; SINGHA, L. P.; SHUKLA, P. **Biotechnological potential of microbial biosurfactants, their applications and environmental sustainability: a review**. FEMS Microbes, v. 10, n. 4, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1093/femsmc/xtad015>
- LAVANYA, M. **Rhamnolipids: an insight to the overall characteristics of these extraordinary biomolecules**. Green Chemistry Letters and Reviews, v. 17, n. 1, 4 jul. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/17518253.2024.2371012>
- LAVANYA, M.; MACHADO, A. A. **Surfactants as biodegradable sustainable inhibitors for corrosion control in diverse media and conditions: A comprehensive review**. Science of The Total Environment, v. 908,, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168407>
- LOURENÇO, M.; DUARTE, N.; RIBEIRO, I.A.C. **Exploring Biosurfactants as Antimicrobial Approaches**. Pharmaceuticals, v. 17, n. 9, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/ph17091239>
- MEKONNEN, B. A.; ARAGAW, T. A.; GENET, M. B. **Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil: a review on principles, degradation mechanisms, and advancements**. Frontiers in Environmental Science, v. 12, 22 fev. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1354422>
- MELIKOGLU, M. **Biosurfactants for enhanced oil recovery and bioremediation in the modern petroleum industry: A global review**. JCIS Open, v. 21, 100168, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jciso.2025.100168>
- MIAO, Y. *et al.* **Sustainable biosurfactant production from secondary feedstock—recent advances, process optimization and perspectives**. Frontiers in Chemistry, v. 12, 19 jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1327113>
- MISHRA, A; TRIVEDI, R. K. **Kinetic study of biosurfactant production with *Pseudomonas aeruginosa* MTCC 424 using residual rice bran oil as substrate**. Indian Journal of Chemical Technology, v. 33, n. 3, p. 344-350, 2026. DOI: <https://doi.org/10.56042/ijct.v33i3.27343>
- MOBIN, M. *et al.* **Crude oil storage tank clean-up using biosurfactants**. Industrial Applications of Biosurfactants and Microorganisms, p. 107–119, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13288-9.00008-5>
- NEGRETE, P. S. *et al.* **Biosurfactant production by *Rhodococcus* ALDO1 isolated from olive mill wastes**. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, v. 57, p. 103106, abr. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103106>
- OKEZIE, O. *et al.* **Recent Application of Biosurfactants: unraveling their potentials towards a cleaner and sustainable environment**. Environmental Management: Engineering and Technology, p. 100005, maio 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jemet.2026.100005>

- OLIVEIRA, K. W. *et al.* **Eco-Friendly Biosurfactant: Tackling Oil Pollution in Marine Ecosystems.** Fermentation, v. 11, n. 4, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation11040199>
- QI, X. *et al.* **A review on surfactin: molecular regulation of biosynthesis.** Archives of Microbiology, v. 205, n. 9, 21 ago. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00203-023-03652-3>
- SAH, D. *et al.* **A review on biosurfactant producing bacteria for remediation of petroleum contaminated soils.** 3 biotech, v. 12, n. 9, 10 ago. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13205-022-03277-1>
- SANCHES, M. A. *et al.* **Production of Biosurfactants by Ascomycetes.** International Journal of Microbiology, v. 2021, p. e6669263, 15 abr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6669263>
- SANI, A. *et al.* **Structural diversity and applications of lipopeptide biosurfactants as biocontrol agents against phytopathogens: a review.** Microbiological Research, v. 278, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127518>
- SARUBBO, L. A. *et al.* **Biosurfactants: production, properties and applications for sustainable remediation technologies.** Biodegradation, v. 33, n. 3, p. 1–20, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108377>
- SATTAR, S. *et al.* **Composition, impacts, and removal of liquid petroleum waste through bioremediation as an alternative clean-up technology: A review.** Heliyon, v. 8, n. 10, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11101>
- SHAHZAD, A. *et al.* **Modern perspectives of heavy metals alleviation from oil contaminated soil: a review.** Ecotoxicology and Environmental Safety, v.282, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116698>.
- SHARMA, N.; LAVANIA, M.; LAL, B. **Biosurfactant: an emerging tool for the petroleum industries.** Frontiers in Microbiology, v. 14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1254557>
- SHI, L. *et al.* **Effect of plant waste addition as exogenous nutrients on microbial remediation of petroleum-contaminated soil.** Annals of microbiology, v. 72, n. 1, 19 jun. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13213-022-01679-3>
- SILVA, Y. A. *et al.* **Biosurfactant from *Candida guilliermondii* UCP 1592 for cleaning and degreasing applications.** Brazilian Journal of Environmental Sciences , v. 60, e2540. DOI: <https://doi.org/10.5327/Z2176-94782540>
- SINGH, N. *et al.* **Microbially derived surfactants: an ecofriendly, innovative, and effective approach for managing environmental contaminants.** Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, v. 12, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1398210>

- SINGHA, L. P.; PANDEY, P. **Rhizosphere assisted bioengineering approaches for the mitigation of petroleum hydrocarbons contamination in soil.** Critical Reviews in Biotechnology, v. 41, n. 5, p. 749–766, 24 fev. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1888066>
- TENDENEDZAI, J. T.; CHIRWA, E. M. N.; BRINK, H. G. **Influence of carbon sources and biosurfactants on selenite and lead bioremediation by *Enterococcus* sp.** South African Journal of Chemical Engineering, v. 55, p. 63–71, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2025.10.008>
- VEGA, G. R.; STAMPINO, P. G. **Bio-based surfactants and biosurfactants: an overview and main characteristics.** Molecules, v. 30, n. 4, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules30040863>
- WANG, Y. *et al.* **Progress in the flocculation and sedimentation mechanisms and jet mixing transportation of heavy components in crude oil storage tanks.** Journal of Pipeline Science and Engineering, p. 100511, abr. 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2026.100511>
- WOJTOWICZ, K. *et al.* **Influence of biosurfactants on the efficiency of petroleum hydrocarbon biodegradation in contaminated soils.** Sustainability, v. 17, n. 14, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17146520>
- WOOD, M. *et al.* **Multidimensional impacts of oil spills in transit: An overview of trend analysis, remediation strategies, and community resilience.** Journal of Environmental Management, v. 393, p. 127185, out. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127185>
- ZHANG, M.; CHEN, Q.; GONG, Z. **Microbial remediation of petroleum-contaminated soil focused on the mechanism and microbial response: a review.** Environmental Science and Pollution Research, v. 31, n. 23, p. 33325–33346, 6 maio 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33474-9>

CAPÍTULO XXI

APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE COPA DE IPÊ (*HANDROANTHUS SERRATIFOLIUS*) PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO EM FORNO DE ALVENARIA: CARACTERÍSTICAS QUALITATIVAS

UTILIZATION OF CANOPY RESIDUES FROM IPÊ (*HANDROANTHUS SERRATIFOLIUS*) FOR CHARCOAL PRODUCTION IN A BRICK KILN: QUALITATIVE CHARACTERISTICS

DOI: 10.51859/amplla.mac6200-21

Brenda Rayana Ferreira Da Silva ¹

Paula Daniele Martins Moraes ²

José Rozendo de Lima Silva ³

Marcele Farias Pereira ⁴

Luana Cristina Gonçalves Ferreira ⁵

Sueo Numazawa ⁶

¹Mestranda em Ciências Ambientais. Instituto Tecnológico Vale, Desenvolvimento Sustentável – ITV-DS

²Doutoranda em Ciências Florestais. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais – UFRA

³Mestrando em Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Agronomia – UFRA

⁴Mestre em Ciências Florestais. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais – UFRA

⁵Mestre em Ciências Ambientais. Instituto Tecnológico Vale, Desenvolvimento Sustentável – ITV-DS

⁶Professor Adjunto da Universidade Federal Rural da Amazonia – UFRA

RESUMO

O aproveitamento de resíduos florestais para bioenergia é uma alternativa sustentável. Este estudo avaliou as propriedades qualitativas do carvão vegetal produzido a partir de resíduos de copa de ipê (*Handroanthus serratifolius*), carbonizados em forno de alvenaria tipo “rabo quente”. A madeira residual foi proveniente de Plano de Manejo Florestal no município de Paragominas, PA. As análises determinaram as características físicas (densidade aparente básica e densidade a granel), químicas (teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo) e mecânica (friabilidade). Os resultados mostraram densidade aparente básica média de 0,618 g/cm³ e densidade a granel de 319,8 kg/m³. O carvão apresentou teor de umidade de 4,55%, materiais voláteis de 30,8%, cinzas de 0,76% e carbono fixo de 63,9% (base úmida) e 68,4% (base seca). Conclui-se que o carvão de resíduos de copa de ipê possui características adequadas para uso energético, com destaque para o baixo teor de umidade e cinzas, demonstrando viabilidade técnica para o aproveitamento sustentável desse resíduo florestal.

Palavras-chave: Biomassa Florestal. Bioenergia. Potencial Energético. Carvão Vegetal.

ABSTRACT

The utilization of forest residues for bioenergy represents a sustainable alternative. This study evaluated the qualitative properties of charcoal produced from canopy residues of ipê (*Handroanthus serratifolius*), carbonized in a brick “hot tail” kiln. The residual wood came from a Forest Management Plan in Paragominas, PA, Brazil. Analyses determined physical (basic apparent density and bulk density), chemical (moisture, volatile matter, ash, and fixed carbon contents), and mechanical (friability) characteristics. Results showed mean basic apparent density of 0.618 g/cm³ and bulk density of 319.8 kg/m³. The charcoal presented moisture content of 4.55%, volatile matter of 30.8%, ash of 0.76%, and fixed carbon of 63.9% (wet basis) and 68.4% (dry basis). It is concluded that charcoal from ipê canopy residues has suitable characteristics for energy use, notably low moisture and ash contents, demonstrating technical feasibility for the sustainable utilization of this forest residue.

Keywords: Forest Biomass. Bioenergy. Energy Potential. Charcoal.



1. INTRODUÇÃO

O avanço da sociedade impulsiona a crescente necessidade de recursos energéticos eficientes e provenientes de fontes alternativas, considerando à sua qualidade e origem. Torna-se evidente a relevância do direcionamento para fontes de recursos renováveis e o concomitante desenvolvimento de tecnologias que propiciem uma boa produção energética, visando a redução do consumo de combustíveis fósseis.

A extensa cobertura vegetal, no território brasileiro, proporciona condições propícias para atividades relacionadas à exploração dos recursos florestais. A extração de madeira em planos de manejo florestal resulta em uma considerável quantidade de material residual, incluindo os resíduos das copas e outros materiais diversos que permanecem na floresta após a extração das árvores. Estima-se que aproximadamente 57,8% desses resíduos sejam compostos por cascas, galhos e folhas (Ibá, 2023).

No Brasil, a madeira é o produto florestal mais amplamente utilizado comercialmente, tendo destaque em seu potencial energético. Aliado a isto, um dos seus subprodutos mais empregados como fonte de energia está historicamente associado à fabricação de carvão vegetal, impulsionado pela elevada demanda por esse componente. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética através da publicação do Balanço Energético Nacional (2023), o carvão vegetal representa cerca de 9,0% do fluxo energético nacional, seja como combustível aquecedor ou como fonte de abastecimento para indústrias.

O carvão vegetal é o produto resultante da pirólise da madeira, um fenômeno de decomposição termoquímica de materiais orgânicos, ocorrendo em deficiência ou ausência de oxigênio. Esta reação é responsável por uma sequência de transformações que resultam em um material composto principalmente por carbono, acompanhado por gases e vapores (Kappler *et al.*, 2023). Em diferentes condições às quais o material é submetido para essa reação, há influência no rendimento obtido (Vidal, 2017; Guilherme *et al.*, 2023).

Os fatores que influenciam a qualidade do carvão são diversos, no entanto, é importante destacar alguns tópicos como a temperatura e a espécie a ser utilizada, considerando aspectos como a densidade da madeira, o tamanho das peças e o método de carbonização (Brito, 1990; Santos, 2008; Vale *et al.*, 2010; Mota, 2013; Souza *et al.* 2016).

A biomassa florestal desempenha um papel significativo na geração de energia, constituindo-se como uma matéria-prima renovável e apresentando baixos níveis de poluição

em comparação com os combustíveis fósseis. O estado do Pará destaca-se como um dos principais centros de produção de carvão vegetal, predominantemente caracterizado pela utilização de fornos rudimentares de alvenaria, os quais são pouco mecanizados e altamente dependentes de mão de obra (Bustamante-García *et al.*, 2013).

Handroanthus serratifolius Vahl, pertencente à família Bignoniaceae e vulgarmente conhecida como ipê amarelo e pau d'arco, é uma espécie de grande interesse comercial, principalmente para a exportação de madeira, devido à sua alta densidade, sendo caracterizada como média/pesada. Essa característica é importante para a produção do carvão vegetal, pois a qualidade do material de origem poderá obter influência sobre o rendimento final do produto (Silva, *et al.* 2018).

Portanto, o objetivo desse estudo foi avaliar as propriedades qualitativas do carvão produzido com galhadas de copa remanescente após a extração de árvores no Plano de Manejo Florestal. Desenvolvido para realizar as análises qualitativas do carvão produzido com madeira residual da copa de ipê procedente de Plano de Manejo Florestal, carbonizada em forno de alvenaria na Fazenda Rio Capim da Empresa CKBV FLORESTAL Ltda. Comércio e Indústria KEILLA S/A, no Município de Paragominas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. LOCAL E COLETA DE MATERIAL

O estudo foi realizado com madeira constituída de galhadas de copas remanescentes após a extração das árvores da espécie Ipê (*Handroanthus serratifolius* Vahl S. O. Grose) dentro do Plano de Manejo Florestal, na Fazenda Rio Capim pertencente à Empresa CKBV FLORESTAL LTDA Comércio e Indústria KEILLA S/A, localizada no município de Paragominas, Estado do Pará.

2.2. CARBONIZAÇÃO

A carbonização de resíduos de copas de árvores de Ipê foi realizada nas unidades de produção de carvão (Figura 1A), na Fazenda Rio Capim, utilizando-se fornos de alvenaria tipo Rabo Quente (Figura 1B e 1C), conforme visto na Figura 1.

Figura 1 - Carvoaria da Fazenda Rio Capim, CKBV/ KEILLA S/A: Unidade de produção (A) e Fornos de alvenaria tipo “Rabo Quente” (B) e (C).



Fonte: Autoria própria.

Os resíduos foram transportados para a carvoaria, sendo realizados os procedimentos de carbonização, constituídos das etapas de preparo de material; carregamento; carbonização; esfriamento e descarregamento do carvão.

2.3. ESTUDO QUALITATIVO DO CARVÃO PRODUZIDO COM MADEIRA RESIDUAL DA COPA DE IPÊ

Após o processo de carbonização, foram coletados 5 (cinco) sacos de 60 litros preenchidos de carvão, os quais foram encaminhados para o Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais – LTPF da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Campus Belém, onde foram realizados os estudos qualitativos, abordando os atributos físicos (densidade básica e densidade do carvão a granel), químicos (teor de umidade, teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo), energéticos (poder calorífico, inferior e útil) e mecânico (friabilidade) do carvão vegetal.

2.4. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

2.4.1. Determinação da densidade aparente do carvão. (g/cm^3)

A densidade aparente básica do carvão foi determinada com base na NBR 11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2003), que estabelece a relação entre o peso

da amostra de carvão absolutamente seco pelo seu volume completamente saturado de água. Foram preparados doze corpos de prova de forma aleatória de cada lote do carvão, previamente identificados, para a realização da saturação com o auxílio de bomba a vácuo. Após a saturação, os volumes dos corpos de prova foram determinados pelo método de pesagem (Princípio de Arquimedes). Posteriormente, os corpos de prova saturados foram colocados em estufa a 105°C até a completa secagem (Po). A Densidade Aparente Básica (DBás) foi calculada através da Equação.

$$DAp(básica) = \frac{P_{(0\%)}}{V_{(saturado)}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: $DAp(básica)$ - densidade aparente básica, g/cm³; $P_{(0)}$ - peso do corpo de prova a 0% de umidade, g; $V_{(saturado)}$ - volume do corpo de prova saturado, cm³.

2.4.2. Determinação da densidade do carvão a granel

A densidade do carvão a granel correspondeu a quantidade de carvão contido em um recipiente de volume interno conhecido. De cada lote de carvão, foram retiradas duas porções que foram colocadas em um recipiente com volume conhecido (0,0389 m³), o qual foi pesado para a obtenção do peso do carvão a granel contido no recipiente. A densidade do carvão a granel foi calculada pela Equação 2.

$$DC_{(granel)} = \frac{PC_{(granel)}}{V_{(recipiente)}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde: $DC_{(granel)}$ - densidade do carvão a granel, kg/m³ ou kg/mdc; $P_{(carvão a granel)}$ - peso do carvão contido no recipiente, kg; $V_{(recipiente)}$ - volume do recipiente, m³ ou mdc.

2.5. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

2.5.1. Determinação do teor de umidade do carvão (TU)

Para determinar o teor de umidade, foi efetuada a moagem de carvão e sua classificação granulométrica em peneiras e, em seguida, foram pesados cerca de 10 g de carvão particulado úmido ($P_{(u)}$) e colocados em recipientes, sendo quatro amostras de cada saco, totalizando doze amostras em placa de *petri*, depois submetidos à secagem em estufa de circulação de ar forçada a 105°C, até atingir peso constante para obtenção de peso seco do carvão ($P_{(0)}$), baseado na norma ABNT NBR 14929/2017. Os valores de teor de umidade foram calculados pela Equação 3.

$$TU = \frac{P_{(u)} - P_{(0)}}{P_{(u)}} \times 100 \quad \text{Equação 3}$$

Onde: TU – teor de umidade do carvão, %; P(u) - peso do carvão úmido, g; P(o) - peso do carvão seco, g.

2.5.2. Determinação do teor de materiais voláteis contidos no carvão (TMV).

O Teor de Materiais Voláteis – TMV foi determinado com base na norma D1762 da American Society for Testing and Materials (ASTM, 2013). Foram utilizados doze cadinhos de porcelana com tampa (previamente identificados e pesados), contendo aproximadamente 3 g do material seco, sendo submetidos a calcinação em forno tipo mufla sob temperatura de 950°C durante seis minutos. O material remanescente foi pesado em balança analítica para a obtenção do peso do carvão calcinado (P(calc.)), sendo determinado através da Equação 4.

$$TMV = \frac{P_{(o)} - P_{(calc.)}}{P_{(o)}} \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

Onde: TMV – teor de materiais voláteis contidos no carvão, %; P(0) - peso do carvão moído absolutamente seco, g; P(calc.) - volume do carvão moído calcinado à 950°C, g.

2.5.3. Determinação do teor de cinzas contidas no carvão (TCi)

O teor de cinzas consistiu na quantidade do resíduo sólido inorgânico existente após a combustão completa do carvão, foi determinado conforme a norma ASTM D1762 (ASTM, 2013). Para isso, foram utilizados doze cadinhos sem tampa, cada um contendo cerca de 3 g de amostra. Em seguida, os cadinhos foram submetidos a incineração em forno tipo mufla sob temperatura de 750°C durante seis horas e, após o resfriamento em dessecador, foram pesados. O teor de cinzas foi calculado através da Equação 5.

$$TCi = \frac{P_{(Ci)}}{P_{(o)}} \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

Onde: TCi - teor de cinzas contidos no carvão, %; P(o) - peso seco do carvão moído, g; P (ci) - peso das cinzas obtidas após combustão, g.

2.5.4. Determinação do teor de carbono fixo contido no carvão (TCF).

Após a obtenção dos teores de umidade, materiais voláteis e cinzas, foi determinado o teor de carbono fixo a base úmida e base seca, através das Equações 6 e 7.

$$TCF_{(u)} = 100 - (TU + TMV + TCi \text{ (Base úmida)}) \quad \text{Equação 6}$$

$$TCF_{(s)} = 100 - (TMV + TCI \quad (\text{Base seca}) \quad \text{Equação 7}$$

Onde: $TCF_{(u)}$ = teor de Carbono Fixo, base úmida, em %; $TCF_{(bs)}$ = teor de Carbono Fixo, base seca, em %; TU = teor de umidade, em %; TMV = teor de materiais voláteis, em %; TCi = teor de cinzas, em %

2.6. ANÁLISE DE DADOS

As análises estatísticas descritivas dos dados foram conduzidas utilizando o método de Amostragem Aleatória. Se referiram aos cálculos de Média, Variância, Desvio Padrão, Coeficiente de Variação, além dos valores de mínimo e máximo do conjunto de dados obtidos, todas tabuladas e processadas no Microsoft Excel (versão 2021).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO CARVÃO

Os resultados das análises estatísticas descritivas das características físicas do carvão produzido com madeira residual da copa de *H. Serratifolius*, representado pelas densidades aparente básica (DAB) e densidade a granel (DCG), estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Estatística descritiva da Densidade Aparente Básica e Densidade a Granel do carvão de ipê (*H. Serratifolius*)

Estatística Descritiva	DAB (g/cm ³)	DCG (kg/m ³ ou mdc)
Média	0,618	319,8
Variância	0,009	498,3
Desvio Padrão	0,093	22,32
Coeficiente de Variação (%)	15,0	7,0
Mínimo	0,417	286,6
Máximo	0,697	346,3
Erro Padrão	0,027	9,1
Erro Amostragem (absoluta)	0,059	23,43
Erro Amostragem (relativa) (%)	9,6	7,3
n (calculado)	11	3,2

Fonte: Autoria própria.

O valor médio da Densidade Aparente Básica (DAB) do carvão foi de 0,618 g/cm³, variando entre 0,417 e 0,687 g/cm³. O Coeficiente de Variação foi de 15,0% e o Erro de Amostragem Relativo de 9,6%, dentro do limite admissível de 10% ($\alpha = 0,05$). Silva *et al.* (2020) encontraram valor similar (0,625 g/cm³) para a mesma espécie. Essa propriedade é diretamente proporcional à densidade básica da madeira, que para o ipê é classificada como

média/pesada (0,93 g/cm³; SILVA *et al.*, 2018). No entanto, Silva *et al.* (2018) registraram DAB superior (0,700 g/cm³) em estudo com resíduos, evidenciando a variação intraespecífica. Conforme Hietz *et al.* (2013) e Silva *et al.* (2020), essa variação reflete mudanças ambientais e características dendrométricas individuais.

A densidade do carvão a granel teve média de 319,8 kg/m³ (mín. 286,6; máx. 346,3 kg/m³), com CV de 7,0% e erro amostral de 7,3%. Esse parâmetro é essencial para transporte e manuseio industrial (Weber & Quicher, 2018), sendo influenciado pela composição e origem da matéria-prima.

3.2. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO CARVÃO

Os resultados das análises estatísticas descritivas das características químicas do carvão produzido com madeira residual da copa de *H. Serratifolius*, representados por Teor de Umidade (TU), Teor de Materiais Voláteis (TMV), Teor de Cinzas (TCi), Teor de Carbono Fixo base úmida (TCF_(u)) e base seca (TCF_(s)), estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Estatística descritiva dos valores médios de Teores de Umidade; Materiais Voláteis; Cinzas e Carbono Fixo base úmida e base seca do carvão de ipê (*H. Serratifolius*).

Estatística	TU (%)	TMV (%)	TCi (%)	TCF _(u) (%)	TCF _(s) (%)
Média	4,55	30,8	0,76	63,9	68,4
Variância	0,103	3,926	0,014	3,235	3,900
Desvio Padrão	0,321	1,981	0,117	1,798	1,975
Coef. Variação (%)	7,1	6,4	18,1	2,8	2,9
Mínimo	3,97	27,8	0,62	61,6	65,9
Máximo	5,07	33,4	0,95	66,4	71,4
Erro Padrão	0,093	0,572	0,034	0,519	0,570
EA(absoluta)	0,204	1,259	0,074	1,143	1,255
EA(relativa)	4,5	4,1	11,5	1,8	1,8
n (calculado)	2,4	2	15,9	0,4	0,4

EA – Erro de Amostragem

Fonte: Autor, 2024.

O valor médio encontrado para o teor de umidade (TU) foi de 4,55%, apresentando valores de mínimo e máximo de 3,97% e 5,07%, respectivamente. O coeficiente de variação obtido foi de 7,1% e o EA(r) de 4,5%. O carvão é um material higroscópico, com capacidade de absorver ou reter umidade do ambiente. Segundo Silva (2017), o carvão pode absorver entre 4% e 16% de água em poucas horas. A princípio, dependendo das condições em que o material é submetido para ser armazenado, a adsorção ocorre de forma rápida. Mas ao longo do tempo, tende a sofrer uma redução nesse ganho até atingir seu equilíbrio higroscópico com o

ambiente (Andrade; Della Lucia, 1995). Quando se trata de uso de carvão, sempre existe limite de teor de umidade ideal em função de uso, como por exemplo, no setor siderúrgico que Assis *et al.* (2016), citado por Costa (2020), menciona que este valor deve ser inferior a 7%.

O teor médio de umidade (TU) encontrado neste estudo foi de 4,55%, um valor que está de acordo com os padrões de qualidade para o carvão vegetal. No caso específico do que estabelece a Resolução SAA-40 do Estado de São Paulo sobre qualidade de carvão para uso doméstico, o teor médio de umidade deve estar abaixo de 5,0% (São Paulo, 2015). O valor médio para teor de materiais voláteis (TMV) foi de 30,8%, apresentando valores de mínimo e máximo de 27,8% e 33,4%, respectivamente. O coeficiente de variação obtido foi de 6,4% e o EA(r) de 4,1%. Os valores encontrados foram superiores aos que foram encontrados por Silva *et al.* (2018) com carvão de ipê produzido sob temperaturas de 450 °C e 500 °C, obtendo médias de 22,9% e 22,5%, respectivamente.

A quantidade de voláteis presente no carvão produzido em forno tipo rabo quente varia de acordo com o processo de carbonização. Durante esse procedimento, a entrada de ar no forno e a operacionalização da carbonização são fatores cruciais, podendo influenciar em maior ou menor grau de volatilização devido às variações de temperatura no processo de pirólise. Sendo assim, é possível inferir que a temperatura afeta determinadas características do carvão vegetal. Esse argumento é confirmado pela pesquisa de Mendes *et al.* (1982), os quais comprovaram que o aumento na temperatura de carbonização de 300 °C para 700 °C promoveu o acréscimo no teor de carbono fixo e um decréscimo no teor de materiais voláteis.

O valor médio para teor de cinzas (TCi) foi de 0,76%, com valores de mínimo e máximo de 0,62% e 0,95%, respectivamente. O coeficiente de variação obtido foi de 18,1% e o EA(r) de 11,5%. O valor de erro de amostragem extrapolou o limite de erro admissível de 10%, certamente decorrente da alta variação de conteúdo de componentes minerais (cinzas) nas amostras utilizadas nas análises laboratoriais. As cinzas são constituídas de materiais inorgânicos compostos de resíduos de óxidos de minerais obtidos a partir da combustão completa, não sofrendo processo de queima. Valores elevados de TCi causam leve influência sobre o poder calorífico do carvão pelo fato desses componentes minerais absorverem energia do sistema. O valor médio de TCi encontrado neste estudo está próximo aos encontrados por Silva *et al.* (2018) e Silva *et al.* (2020), apresentando valor de 1,2% e 0,84%, respectivamente, para teor de cinzas de *H. serratifolius*. O baixo teor de cinzas no carvão é um fator positivo, tornando-o um produto com maior eficiência na questão energética.

O teor de carbono fixo representa a quantidade de carbono sólido presente no carvão. O valor médio de TCF base úmida foi de 63,9%, com valores de mínimo e máximo de 61,6% e 66,4%, respectivamente. O coeficiente de variação obtido foi de 2,8% e o EA(r) de 1,8%. No caso do carvão com ausência de umidade (base seca), o TCF médio encontrado foi de 68,4%, com variações mínima e máxima de 65,9% e 71,4%. O coeficiente de variação obtido foi de 2,9% e o EA(r) de 1,8%. Considerando que o teor de carbono fixo está relacionado com os teores de materiais voláteis e cinzas, este fato resultou em valor relativamente baixo de TCF, devido principalmente ao elevado teor de materiais voláteis. Para todos os componentes químicos, os erros de amostragem relativa foram inferiores ao erro admissível de 10%, garantindo a precisão requerida para $\alpha = 0,05$ de probabilidade.

Os resultados do presente estudo mostraram valores próximos aos obtidos por Medeiros Neto *et al.* (2014) para o carvão produzido a partir da madeira de *Handroanthus* sp., alcançando 67,67% para o TCF. No entanto, esses resultados apresentaram valores mais baixos que os encontrados por Silva *et al.* (2018) para a mesma espécie em diferentes temperaturas, registrando valores de 75,7% e 76,3% de TCF para temperaturas de 450 °C e 500 °C.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos, é possível destacar as seguintes considerações finais: O carvão de resíduos de exploração florestal de ipê produzido em forno e alvenaria “rabo quente” apresentou elevado valor de densidade básica e densidade a granel, indicando ser muito próprio para uso que relaciona massa por unidade de volume de carvão.

Quanto às características químicas, observou-se que a qualidade do carvão de ipê referente a teor de umidade tem um padrão compatível para uso energético com pouca umidificação adquirida do meio ambiente. Os teores de materiais voláteis e carbono fixo contidos no carvão se apresentam dentro dos limites, podendo ser destinado para mercado que exige percentual desses componentes químicos mínimo de 65% de carbono fixo e de máximo de 30% de materiais voláteis. Como o teor de cinzas no carvão foi relativamente baixo, a energia retida pelos componentes minerais tende a afetar muito pouco, de forma negativa, o poder calorífico do carvão. Considerando as características apresentadas, pode-se inferir que o carvão de ipê produzido em forno de alvenaria apresenta potencial para uso energético e para outros destinos que exigem as qualidades especificadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14929: madeira — determinação do teor de umidade de cavacos** — método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2017.
- ANDRADE, A. M.; DELLA LUCIA, R. M. Avaliação da higroscopicidade do carvão vegetal e seus efeitos na resistência ao esmagamento. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 2, p. 20–26, 1995.
- ASSIS, M. R. *et al.* Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. **Wood Science and Technology**, New York, v. 50, p. 519–536, mar. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941: madeira — determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro, 2003.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1762-84: standard test method for chemical analysis of wood charcoal**. United States, 2013.
- BRITO, J. O. Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira. Piracicaba: **ESALQ/USP**, 1990.
- BUSTAMANTE-GARCÍA, V. *et al.* Evaluation of a charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl. in a Brazilian beehive kiln. **Industrial Crops and Products**, v. 42, p. 169–174, 2013.
- COSTA, L. J. Relação água-carvão vegetal de eucalipto produzido em diferentes temperaturas. 2020. 105 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - **Universidade Federal de Viçosa**, Minas Gerais. 2020.
- EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2023: ano base 2022**. Brasília, DF, 2023.
- GUILHERME, C. D; RAIMUNDO, G. A. S.; D’AMELIO, M. T. S. ESTUDO DA CINÉTICA DA PIRÓLISE DA MADEIRA DE EUCALIPTO RESIDUAL DA PRODUÇÃO DE PAPEL. **Ensaio USF**, v. 7, n. 2, 2023.
- HIETZ, P. *et al.* Strong radial variation in wood density follows a uniform pattern in two neotropical rain forests. **Functional Ecology**, v. 27, p. 684–692, 2013.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório IBÁ 2023**. São Paulo, 2023.
- KAPPLER, G. *et al.* Diagnóstico ambiental de uma carvoaria: um estudo de caso. **MIX Sustentável**, v. 9, n. 1, p. 102–108, 2023.
- MEDEIROS NETO, P. N.; OLIVEIRA, E.; PAES, J. B. Relações entre as características da madeira e do carvão vegetal de duas espécies da Caatinga. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, p. 484–493, 2014.

- MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal. Belo Horizonte: **CETEC**, 1982. (Série de Publicações Técnicas, n. 8).
- MOTA, G. S. **Estudo da qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. em diferentes idades**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.
- SANTOS, R. C. **Propriedades da madeira de clones de *Eucalyptus* spp. cultivados no distrito florestal de colombo para fins energéticos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.
- SÃO PAULO (Estado). **Resolução SAA-40, de 14 de dezembro de 2015. Estabelece norma de padrões mínimos de qualidade para carvão vegetal**. São Paulo, 2015.
- SILVA, L. F. F. *et al.* Seleção de espécie, temperatura e tempo de carbonização na produção de carvão vegetal com resíduos madeireiros da Amazônia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 40, 2020.
- SILVA, R. C. *et al.* Influência da temperatura final de carbonização nas características do carvão vegetal de espécies tropicais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 38, 2018.
- SILVA, W. A. S. Avaliação da influência da densidade do carvão vegetal nos custos de transporte. 2017. Dissertação (Mestrado) – **Universidade Federal de Viçosa**, Viçosa, 2017.
- SOUZA, N. D. *et al.* Estudo de caso de uma planta de carbonização: avaliação de características e qualidade do carvão vegetal visando uso siderúrgico. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 23, p. 270–277, 2016.
- VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. Relações entre propriedades químicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 137-145, 2010.
- VIDAL, P. R. de O. **Influência das condições de carbonização no rendimento e na qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp.** 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2017.
- WEBER, K.; QUICKER, P. Properties of biochar. **Fuel**, v. 217, p. 240–261, 2018.

CAPÍTULO XXII

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CARVÃO VEGETAL DE *BAMBUSA VULGARIS* SCHRAD. PARA USO ENERGÉTICO

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF CHARCOAL FROM *BAMBUSA VULGARIS* SCHRAD. FOR ENERGY USE

DOI: 10.51859/amplla.mac6200-22

Suellen Santos da Silva¹

Marcele Farias Pereira²

Vitoria Luiza dos Passos³

Paula Daniele Martins Moraes⁴

Angela Batista Guimarães⁵

Sueo Numazawa⁶

¹ Engenheira Florestal. Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA

² Mestre em Ciências Florestais. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais – UFRA

³ Mestranda em Ciências Florestais. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais – UFRA

⁴ Doutoranda em Ciências Florestais. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais – UFRA

⁵ Mestranda em Ciências Florestais. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais – UFRA

⁶ Professor da Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

RESUMO

A busca por fontes renováveis de energia torna o carvão vegetal de biomassa uma alternativa promissora. Este estudo teve como objetivo produzir e caracterizar o carvão vegetal de colmos de *Bambusa vulgaris* Schrad., carbonizados em forno de alvenaria, avaliando suas propriedades físicas, químicas, mecânicas e energéticas, a fim de determinar seu potencial como fonte renovável de energia. Foram realizadas três carbonizações nas temperaturas de 350°C, 400°C e 450°C, e o carvão resultante foi submetido à caracterização física (densidade básica do bambu e do carvão, rendimento gravimétrico), química imediata (teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo), mecânica (friabilidade) e energética (poder calorífico superior, inferior e útil). Os resultados mostraram uma densidade básica média do bambu de 0,557 g/cm³ e do carvão de 0,335 g/cm³. O rendimento gravimétrico médio foi de 26,45%. O carvão apresentou alto teor de carbono fixo (63,34% na base seca), baixo teor de cinzas (2,6%), baixo teor de umidade (2,17%) e alto poder calorífico superior médio (6627,15 Kcal/kg). O resultado mais expressivo foi a baixíssima friabilidade de 9,6%, classificando o carvão como "muito pouco friável". Conclui-se que o carvão de *Bambusa vulgaris* apresenta características satisfatórias e competitivas para uso energético, destacando-se por sua excelente resistência mecânica.

Palavras-chave: Bambu. Bioenergia. Carvão vegetal. Friabilidade. Poder calorífico.

ABSTRACT

The search for renewable energy sources has made biomass charcoal a promising alternative. This study aimed to produce and characterize charcoal from culms of *Bambusa vulgaris* Schrad., carbonized in a masonry kiln, by evaluating its physical, chemical, mechanical, and energetic properties in order to determine its potential as a renewable energy source. Three carbonization processes were carried out at temperatures of 350°C, 400°C, and 450°C, and the resulting charcoal was subjected to physical characterization (basic density of bamboo and charcoal, gravimetric yield), proximate chemical analysis (moisture, volatile matter, ash, and fixed carbon contents), mechanical analysis (friability), and energetic evaluation (higher, lower, and net calorific values). The results showed an average basic density of 0.557 g/cm³ for bamboo and 0.335 g/cm³ for charcoal. The average gravimetric yield was 26.45%. The charcoal exhibited a high fixed carbon content (63.34% on a dry basis), low ash content (2.6%), low moisture content (2.17%), and a high average higher heating value (6627.15 kcal/kg). The most notable result was the very low friability (9.6%), classifying the charcoal as "very slightly friable". It can be concluded that charcoal from *Bambusa vulgaris* presents satisfactory and competitive characteristics for energy use, particularly due to its excellent mechanical resistance.

Keywords: Bamboo. Bioenergy. Charcoal. Friability. Calorific value.



1. INTRODUÇÃO

Com ampla adaptação e elevado grau de endemismo no país, o bambu imperial (*Bambusa vulgaris* Schrad.) é uma espécie exótica introduzida no Brasil a partir da Ásia durante o período colonial (Brand *et al.*, 2020). Pertencente ao gênero *Bambusa* e à família Poaceae, essa espécie apresenta boa adaptação às condições tropicais, o que favorece sua ampla distribuição no território nacional (Kelchner *et al.*, 2013). A diversidade de espécies de bambu tem ampliado suas aplicações, incluindo uso na construção civil, produção de móveis, recuperação de áreas degradadas e, mais recentemente, geração de energia (Alcântara *et al.*, 2023).

As espécies de bambu podem ser colhidas em ciclos curtos, em média a cada quatro anos, evidenciando seu rápido crescimento e elevada produtividade (Liu *et al.*, 2014). Essas características contribuem para sua utilização em diferentes setores, como papel e celulose, biocombustíveis e indústria farmacêutica (Maia *et al.*, 2022). Embora o eucalipto seja atualmente a principal matéria-prima utilizada na produção de carvão vegetal no Brasil, o bambu apresenta vantagens comparativas, como menor custo de produção e menor tempo de corte (Ostapiv, 2023). Plantios de *Bambusa vulgaris* podem ser explorados a partir de três anos (Andrade *et al.*, 2015; Ostapiv, 2023), enquanto o eucalipto geralmente requer cerca de sete anos para colheita (Ramos *et al.*, 2023). Além disso, o bambu apresenta incremento anual de biomassa entre 22 e 44 m²/ha, valor semelhante ou levemente superior ao do eucalipto (Marafon *et al.*, 2019).

Na produção de carvão vegetal, a estrutura empregada na carbonização influencia diretamente o processo. Os fornos apresentam diferentes configurações, todas voltadas à decomposição térmica da biomassa, processo no qual ocorre a concentração de carbono por meio da eliminação de compostos voláteis, como água e gases (Froehlich *et al.*, 2014). O carvão obtido apresenta propriedades físicas, químicas, mecânicas e energéticas que orientam sua aplicação (Brito *et al.*, 1982).

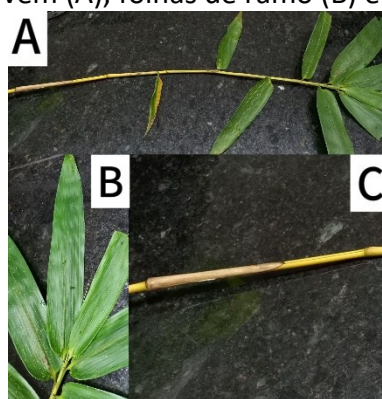
Diante desse contexto, este trabalho teve como objetivo produzir e caracterizar o carvão vegetal de colmos de *Bambusa vulgaris* Schrad., carbonizados em forno de alvenaria, avaliando suas propriedades físicas, químicas, mecânicas e energéticas, com o propósito de analisar seu potencial como fonte renovável de energia.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. MATÉRIA-PRIMA E PREPARO DAS AMOSTRAS

A matéria-prima para as análises foi procedente de área próxima ao Laboratório de Tecnologia de Produção de Produtos Florestais (LTPF) da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), campus Belém-PA (Figura 1). Os bambus foram cortados em peças de 50 cm e classificados por diâmetro (fino, médio e grosso). Visando a estabilização da umidade, as amostras foram estocadas no laboratório durante 60 dias antes do início das análises e da carbonização.

Figura 1 – Colmo jovem (A), folhas de ramo (B) e folhas de colmo (C).



Fonte: Autoria própria

O experimento foi conduzido sem delineamento estatístico com tratamentos controlados, uma vez que as carbonizações foram realizadas em um protótipo de forno de alvenaria, sem sistema automatizado de controle de temperatura, operando sob condições reais de produção artesanal. Foram realizadas carbonizações em diferentes condições térmicas, com temperaturas máximas monitoradas por medidor equipado com três termopares.

Para cada carbonização, as análises físicas, químicas e energéticas foram conduzidas com repetições amostrais, sendo dez repetições ($n=10$) para os parâmetros de densidade básica e teor de umidade, e cinco repetições ($n=5$) para friabilidade e análises químicas imediatas realizadas em mufla.

2.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO BAMBU

O teor de umidade dos anéis de bambu foi determinado conforme a NBR 16828-2 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (Tiburtino *et al.*, 2015). As amostras foram inicialmente pesadas para obtenção do peso úmido e, em seguida, levadas para secagem em

estufa a 105°C até atingirem peso constante, obtendo-se assim o peso seco. O teor de umidade foi calculado pela relação percentual entre a massa de água perdida e a massa seca final.

A densidade básica foi determinada pela relação entre o peso seco e o volume saturado dos anéis de bambu (Tiburtino *et al.*, 2015). Os anéis foram imersos em água para saturação com auxílio de bomba à vácuo. Após essa etapa, o volume saturado foi determinado pelo método de pesagem, utilizando o Princípio de Arquimedes. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 105°C até peso constante para obtenção do peso seco.

2.3. CARBONIZAÇÃO

A carbonização foi realizada em um protótipo de forno de alvenaria com capacidade de aproximadamente 2,0 m³, localizado na Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), campus Belém. Foram realizadas três carbonizações com temperaturas máximas de 350°C, 400°C e 450°C, mapeadas com medidor dotado de três termopares.

2.4. RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO

O rendimento gravimétrico foi determinado pela relação percentual entre a massa de carvão produzido e a massa de bambu seco utilizada em cada carbonização.

2.5. CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO

2.5.1. Densidade básica do carvão

A densidade básica do carvão de bambu foi determinada com base na NBR 11941 da ABNT (2003). Os corpos de prova, constituídos de nós e entrenós, foram submetidos à saturação em água destilada com auxílio de bomba à vácuo. Em seguida, o volume saturado foi determinado pelo método de pesagem (Princípio de Arquimedes). Após essa etapa, os corpos de prova foram secos em estufa a 105°C até peso constante para obtenção do peso seco. A densidade básica foi calculada pela razão entre o peso seco e o volume saturado.

2.5.2. Análise química imediata

A caracterização química imediata do carvão foi feita com base na Norma D1762-84 da American Society for Testing and Materials (ASTM), para obtenção dos teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.

O teor de umidade foi determinado após a secagem do carvão triturado e classificado em estufa a 105°C até peso constante. O teor de materiais voláteis foi obtido por calcinação

do carvão seco em mufla a 950°C por seis minutos, sendo o resultado expresso pela perda de massa durante o processo. O teor de cinzas foi determinado por incineração completa do carvão em mufla a 750°C por seis horas, restando apenas os materiais inorgânicos. O teor de carbono fixo foi calculado por diferença entre 100% e a soma dos teores de materiais voláteis e cinzas, em base seca.

2.5.3. Poder calorífico

As características energéticas do carvão foram determinadas pelos poderes caloríficos superior, inferior e útil, calculados a partir das composições químicas imediatas utilizando as equações empíricas propostas por Parikh et al. (2005), amplamente validadas na literatura para biomassas lignocelulósicas.

2.5.4. Friabilidade

A friabilidade foi determinada com base na metodologia do Centre Technique Forestier Tropical (CTFT, 1972), que consiste em submeter o carvão a movimento rotativo em um tambor a 30 rotações por minuto durante 15 minutos. A friabilidade foi expressa pela relação percentual entre a perda de massa (geração de finos) e a massa inicial do carvão.

2.6. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Foram realizadas análises estatísticas descritivas dos dados, com base no processo de amostragem aleatória utilizado no trabalho. Foram calculados média, variância, desvio padrão, coeficiente de variação, valores mínimo e máximo, erro padrão, erro de amostragem absoluto e relativo, além do "n" calculado para cada conjunto de dados coletados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO BAMBU

A densidade básica média foi de 0,557 g/cm³, valor compatível com aqueles reportados para a mesma espécie por outros autores (Tomazello *et al.*, 1987; Lestari *et al.*, 2018; Wahab *et al.*, 2009) (Tabela 1). Observa-se que os colmos de menor diâmetro (topo) apresentaram maior densidade básica (0,602 g/cm³) em relação aos de maior diâmetro (base), com valores de 0,534 g/cm³ (médio) e 0,529 g/cm³ (grosso). Esse comportamento está de acordo com a literatura, que indica aumento da densidade ao longo da altura do colmo (Wahab *et al.*, 2009; Tomazello *et al.*, 1987).

O teor de umidade médio do bambu foi de 34,9%, inferior aos valores reportados por outros estudos (Costa, 2004; Balduino, 2016). Teores mais baixos podem contribuir para menor incidência de fissuras durante a pirólise, favorecendo a integridade do carvão produzido.

3.2. RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO

O rendimento gravimétrico médio foi de 26,45%, situando-se dentro das faixas reportadas para fornos de alvenaria (Brito *et al.*, 1981; Pincelli *et al.*, 2022) (Tabela 1). Mesmo sem controle rigoroso de temperatura, o resultado foi comparável e ligeiramente superior ao observado para eucalipto em sistemas semelhantes (Arruda *et al.*, 2011). Os rendimentos por temperatura foram de 26,73% a 350°C, 26,15% a 400°C e 26,47% a 450°C, indicando baixa variação entre as condições avaliadas.

3.3. DENSIDADE BÁSICA DO CARVÃO

A densidade básica média do carvão foi de 0,335 g/cm³, representando redução de aproximadamente 40% em relação ao material original, em função da perda de compostos voláteis durante a carbonização (Tabela 1). Esse valor é compatível com dados da literatura para diferentes espécies de bambu (Santos *et al.*, 2016). A relação entre densidade da matéria-prima e do carvão é bem estabelecida, sendo materiais mais densos associados a carvões também mais densos (Numazawa, 1990; Brand *et al.*, 2020). As densidades obtidas por temperatura foram de 0,345 g/cm³ (350°C), 0,334 g/cm³ (400°C) e 0,326 g/cm³ (450°C).

Tabela 1 - Características físicas do bambu (*Bambusa vulgaris*) e do carvão produzido

Parâmetro	Fino	Médio	Grosso	Média
Densidade básica do bambu (g/cm ³)	0,602	0,534	0,529	0,557
Teor de umidade do bambu (%)	34,1	35,3	35,2	34,9
Rendimento gravimétrico (%)	-	-	-	26,45
Densidade básica do carvão (g/cm ³)	-	-	-	0,335

Fonte: Autoria própria.

3.4. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS IMEDIATAS E ENERGÉTICAS DO CARVÃO

O teor de umidade médio (2,17%) atende aos limites estabelecidos para uso doméstico e é inferior aos relatados na literatura (Brand *et al.*, 2020; Pincelli, 2022) (Tabela 2). Baixos teores favorecem a ignição e o desempenho energético (Kurauchi, 2010).

O teor de materiais voláteis (34,4%) (Tabela 2) foi superior ao observado em outros estudos (Brand *et al.*, 2020; Andrade *et al.*, 2015; Costa, 2004), o que pode ser explicado pelas temperaturas relativamente mais baixas de carbonização. Observa-se redução dos voláteis com o aumento da temperatura, conforme esperado (Costa, 2004). O teor de cinzas (2,6%) foi inferior ao reportado na literatura (Tomazello *et al.*, 1987; Brand *et al.*, 2020; Costa, 2004), o que é desejável, uma vez que esses componentes não contribuem para a geração de energia (Lins *et al.*, 2020; Assis, 2008). O teor de carbono fixo médio foi de 63,34%, com aumento proporcional à temperatura de carbonização, comportamento já descrito na literatura (Froehlich *et al.*, 2014).

O poder calorífico superior médio (6627,15 kcal/kg) (Tabela 2) indica bom desempenho energético, sendo superior a valores previamente reportados para a espécie (Costa, 2004). Esse parâmetro apresentou relação direta com o teor de carbono fixo, além disso, observou-se relação direta entre o poder calorífico e a temperatura de carbonização, com aumento de 6571,61 kcal/kg (350°C) para 6682,55 kcal/kg (450°C), acompanhando a elevação do teor de carbono fixo.

Tabela 2 - Análise química imediata e poder calorífico do carvão de *Bambusa vulgaris*

Parâmetro	350°C	400°C	450°C	Média
Teor de umidade (%)	1,19	3,40	2,21	2,17
Materiais voláteis (%)	35,0	33,8	33,3	34,4
Cinzas (%)	2,61	2,61	2,62	2,6
Carbono fixo (%)	62,39	63,57	64,43	63,34
PCS (Kcal/kg)	6571,61	6627,29	6682,55	6627,15

Fonte: Autoria própria.

3.5. CARACTERÍSTICA MECÂNICA – FRIABILIDADE

De acordo com a classificação adotada (CTFT, 1975), o carvão produzido é considerado muito pouco friável (Tabela 3), o que indica elevada resistência à geração de finos durante manuseio e transporte. O valor obtido (9,6%) é inferior ou comparável a resultados reportados para carvões de outras matérias-primas (Donato *et al.*, 2020), e significativamente menor que aqueles observados para resíduos florestais (Guimarães, 2021; Santos, 2021). Essa característica representa vantagem operacional, reduzindo perdas e emissão de partículas durante o uso.

Tabela 3 - Friabilidade do carvão de *Bambusa vulgaris*

Parâmetro	Valor
Friabilidade média (%)	9,6
Classificação (ctft, 1975)	Muito pouco friável

Fonte: Autoria própria.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o carvão vegetal produzido a partir de colmos de *Bambusa vulgaris* Schrad., em forno de alvenaria, apresenta desempenho adequado para uso energético, reunindo propriedades físicas, químicas e mecânicas consistentes.

O rendimento gravimétrico médio (26,45%) e a densidade básica do carvão (0,335 g/cm³) situam-se dentro das faixas reportadas na literatura, indicando que o processo de carbonização adotado foi eficiente, mesmo sem controle rigoroso de temperatura. As análises químicas evidenciaram um material de boa qualidade, caracterizado por baixo teor de umidade (2,17%) e de cinzas (2,6%), associados a elevado teor de carbono fixo (63,34% na base seca), fatores diretamente relacionados ao desempenho na combustão.

O poder calorífico superior médio de 6627,15 Kcal/kg confirma o bom potencial energético do material, posicionando o carvão de bambu como alternativa comparável às matérias-primas tradicionalmente utilizadas, como o eucalipto. Destaca-se, ainda, a baixa friabilidade (9,6%), que classifica o carvão como muito pouco friável. Essa característica indica maior resistência à geração de finos durante o manuseio, transporte e uso, reduzindo perdas e favorecendo sua aplicação prática. Dessa forma, o *Bambusa vulgaris* mostra-se uma alternativa viável para a produção de carvão vegetal, reunindo rápido crescimento, boa produtividade e um produto final com propriedades adequadas para fins energéticos.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal Rural da Amazônia e ao Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais (LTPF) pela estrutura concedida.

REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, B. K.; COSTA, M. R. N. da; SOLÁ, G. S.; SILVA, T. A. da; VIGA, E. R.; SOUZA, R. R. de; SOUZA, N. G. de; PETERS, L. P.; LOBÃO, M. S. Os múltiplos usos do bambu: uma revisão. In: *Bambu: madeira do futuro: uma compilação de estudos desenvolvidos em instituições de pesquisa nos estados do Acre e do Paraná*. Rio Branco: **Edufac**, V. 2, p. 10-24, 2023.
- ANDRADE, J. K. B.; OLIVEIRA, E.; LIMA, C. R.; CALEGARI, L.; COSTA JÚNIOR, D. S. Potencial produtivo de carvão vegetal da espécie *Bambusa vulgaris* Schrad. cultivado em Timon, MA. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 3, p. 29–33, set. 2015. Disponível em: <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/3619>. Acesso em: 27 mar. 2024.
- ARRUDA, T. P. M. de; PIMENTA, A. S.; VITAL, B. R.; LUCIA, R. M. D.; ACOSTA, F. C. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. **Revista Árvore**, v. 35, n. 4, p. 949–955, 2011.
- ASSIS, C. F. C. de. **Caracterização de carvão vegetal para sua injeção em altos-fornos a carvão vegetal de pequeno porte**. 2008. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008. Disponível em: https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2639/1/DISSERTAÇÃO_CaracterizaçãoCarvãoVegetal.pdf. Acesso em: 10 fev. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11941: madeira — determinação da densidade básica. Rio de Janeiro: **ABNT**, 2003.
- BALDUINO, A. L. J. **Avaliação do potencial energético de duas espécies de bambu cultivadas em Santa Catarina**. 2016. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2016. Disponível em: https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/1483/Ailton_disserta__o_final_15683125441981_1483.pdf. Acesso em: 19 mar. 2024.
- BRAND, M. A.; GAA, A. Z. N.; BALDUINO JUNIOR, A. L.; CUNHA, A. B.; RIOS, P. D. Potencial do uso de quatro espécies de bambu para a produção de carvão vegetal para uso doméstico. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 1, p. 60-71, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509827348>.
- BRITO, J. O. Carvão vegetal no Brasil: gestões econômicas e ambientais. **Estudos Avançados**, v. 4, n. 9, p. 221–227, 1990.
- BRITO, J. O. Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira. **Documentos Florestais**, Piracicaba, v. 9, p. 1–19, maio 1990.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; MURAMOTO, M. C.; COUTO, H. T. Z. do. Estimativa da densidade a granel do carvão vegetal a partir de sua densidade aparente. **IPEF**, n. 150, p. 1–6, out. 1982.

CTFT – CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL. **Resultados de estudos dos produtos da destilação das madeiras amazônicas.** 1972.

COSTA, T. M. de S. **Estudo da viabilidade técnica do emprego do bambu da espécie *Bambusa vulgaris* Schrad. como carvão vegetal.** 74 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear – Materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-11052022-122618/publico/2004CostaEstudo.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2024.

DONATO, B. D.; CARNEIRO, A. de C. O.; CARVALHO, A. M. L. M.; VITAL, B. R.; MILAGRES, G. E.; CANAL, W. D. Influência do diâmetro da madeira de eucalipto na produtividade e propriedades do carvão vegetal. **Ciência da Madeira**, v. 11, n. 2, p. 63-73, set. 2020.

FROELICH, P. L.; MOURA, A. B. D. Carvão vegetal: propriedades físico-químicas e principais aplicações. **Revista Tecnologias e Tendências**, v. 9, n. 1, p. 8-13, 2014.

GUERRA, S. P. S.; SILVA, M. de A.; GARCIA, L. de A.; MELO, R. X. de; TICELLI, M.; MENDES, C. R. L. G.; BRITO, C. M. Estudo de caso de plantio adensado de *Bambusa vulgaris*. In: DRUMOND, P. M.; WIEDMAN, G. (org.). **Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia.** p. 281-289, 2017.

GUIMARÃES, L. K. **Carbonização de mix de resíduos de exploração de plano de manejo florestal e análises qualitativas do carvão.** 2021. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2021.

KELCHNER, S. A.; GROUP, B. P. Higher level phylogenetic relationships within the bamboos based on plastid markers. **Molecular Phylogenetics and Evolution**, v. 67, p. 404–413, 2013.

KURAUCHI, M. H. N. **Caracterização de carvão vegetal.** 2010. 89 f. Dissertação – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2010. Disponível em: <https://repositorio.usp.br>. Acesso em: 21 fev. 2024.

LESTARI, M.; YULI, R.; HARSONO, D.; RAHMI, N. The characteristics of bamboo charcoal. **Indonesian Journal of Industrial Research**, v. 10, n. 1, p. 1-10, 2018.

LIU, Z.; FEI, B.; JIANG, Z.; LIU, X. Combustion characteristics of bamboo-biochars. **Bioresource Technology**, v. 167, p. 94-99, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.023>.

LINS, T. R. da S.; BRAZ, R. L.; JUNIOR, C. G. C. de S.; CORREIA, H. T. V.; SILVA, T. C.; WALTER, L. S. Rendimento e caracterização do carvão vegetal. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5, n. 1, p. 39-43, 2020.

MAIA, M. M.; SOUZA, A. M. de; SOUSA, J. R. L. de; SCHERWINSKI-PEREIRA, J. E.; ROSA, R. C. da; VASCONCELOS, A. D. M.; SANTOS, M. L. dos; RADDATZ, D. D. Incorporação de lodo de esgoto. **Revista Forestal Mesoamericana Kurú**, v. 19, n. 44, p. 21-28, 2022.

- MARAFON, A. C.; AMARAL, A. F. C.; LEMOS, E. E. P. Characterization of bamboo species. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 49, 2019.
- NUMAZAWA, S. Características do carvão vegetal de cupiúba. Belém: **FCAP**, 1990.
- PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV. *Fuel*, v. 84, n. 5, p. 487-494, 2005.
- PINCELLI, A. L. P. S. M.; MINEIRO, V. A. Análise da qualidade do carvão vegetal. **Bioenergia em Revista**, v. 12, n. 2, p. 82-89, 2022.
- RAMOS, D. C.; CARNEIRO, A. C. O.; SIQUEIRA, H. F.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C. Qualidade da madeira e do carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 33, n. 1, 2023.
- SANTOS, D. R. S. et al. Potencial de espécies de bambu como fonte energética. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 111, p. 751-758, 2016.
- SANTOS, R. M. P. **Características qualitativas do carvão produzido com madeira de capoeira**. 2021. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2021.
- SILVA, Y. L. dos S. **Produção de carvão vegetal a partir de resíduos de bambu**. 2019. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2019. Disponível em: <http://bdm.ufpa.br>. Acesso em: 17 mar. 2024.
- TIBURTINO, R. F.; PAES, J. B.; BERALDO, A. L.; ARANTES, M. D. C. Propriedades físicas e mecânicas. **Cerne**, v. 21, n. 3, p. 423-431, 2015.
- TOMAZELLO FILHO, M.; AZZINI, A. Estrutura anatômica. **IPEF**, n. 36, p. 43-50, 1987.
- TOMAZELLO FILHO, M.; SALGADO, A. L. Produção e caracterização do carvão vegetal. **IPEF**, n. 36, p. 13-17, 1987.
- WAHAB, R. et al. Physical characteristics of bamboo. **Journal of Biological Sciences**, v. 9, n. 7, p. 753-759, 2009.

CAPÍTULO XXIII

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO USO DE BIOMORDENTES NO TINGIMENTO DO ALGODÃO COM CORANTES DE ORIGEM VEGETAL

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF BIOMORDANTS ON THE DYEING OF COTTON WITH PLANT-BASED DYES

DOI: 10.51859/amplla.mac6200-23

Maria Eduarda Perez de Melo Brizola¹

Nívea Taís Vila²

Alexandre Jose Sousa Ferreira³

Márcia Gomes da Silva⁴

¹ Graduanda em Engenharia Têxtil. Universidade Estadual de Maringá – UEM

² Professora Associada do Departamento de Engenharia Têxtil. Universidade Estadual de Maringá – UEM

³ Professor Adjunto do Campus Jandaia do Sul. Universidade Federal do Paraná – UFPR

⁴ Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Têxtil. Universidade Estadual de Maringá – UEM

RESUMO

Este estudo avaliou a influência de biomordentes vegetais no tingimento de tecidos de algodão com corantes naturais, visando desenvolver processos têxteis mais sustentáveis. Foram utilizados extratos de cúrcuma, catuaba, casca de jabuticaba e casca de cebola como corantes, além de casca de romã e casca de angico vermelho como biomordentes aplicados em pré-mordentagem. As amostras foram analisadas quanto à intensidade colorística, coordenadas CIELab e solidez à lavagem e à fricção, conforme normas ISO. Os resultados demonstraram que os biomordentes promoveram alterações nas tonalidades, resultando em cores mais intensas e saturadas. Além disso, observou-se melhoria na solidez à lavagem e à fricção da maioria das amostras, indicando maior estabilidade da coloração e menor transferência de cor. Dessa forma, os biomordentes mostraram-se alternativas promissoras e sustentáveis para aplicação no tingimento têxtil com corantes naturais.

Palavras-chave: Corantes naturais. Tingimento Têxtil. Sustentabilidade. Biomordente.

ABSTRACT

This study evaluated the influence of plant-based biomordants on the dyeing of cotton fabrics with natural dyes, aiming to develop more sustainable textile processes. Extracts of turmeric, catuaba, jabuticaba peel, and onion peel were used as dyes, while pomegranate peel and red angico bark were applied as biomordants in the pre-mordanting process. The samples were analyzed regarding color intensity, CIELab coordinates, and wash and rubbing fastness according to ISO standards. The results demonstrated that the biomordants promoted changes in shade, resulting in more intense and saturated colors. In addition, improvements in wash and rubbing fastness were observed for most samples, indicating greater color stability and lower color transfer. Therefore, the biomordants proved to be promising and sustainable alternatives for textile dyeing applications using natural dyes.

Keywords: Natural Dye. Textile Dyeing. Sustainability. BioMordant.

1. INTRODUÇÃO

A indústria têxtil destaca-se como uma das cadeias produtivas de maior relevância econômica no cenário global, porém também figura entre os setores industriais com maior impacto ambiental. O elevado consumo de água, energia e substâncias químicas durante os processos de beneficiamento, especialmente no tingimento têxtil, contribui significativamente para a geração de resíduos líquidos e sólidos potencialmente poluentes. Estima-se que uma parcela expressiva da poluição hídrica industrial esteja associada ao descarte inadequado de efluentes têxteis contendo corantes sintéticos, sais, surfactantes e metais pesados, comprometendo ecossistemas aquáticos e a saúde humana (Pontes et al., 2025).

Diante das crescentes exigências ambientais e da consolidação de políticas voltadas à produção sustentável, observa-se uma retomada do interesse científico e tecnológico pelos corantes naturais como alternativa aos corantes sintéticos derivados do petróleo. Os corantes naturais apresentam vantagens ambientais importantes, como biodegradabilidade, menor toxicidade e origem renovável, além de contribuírem para processos produtivos alinhados aos princípios da química verde e da economia circular. Estudos recentes apontam que a utilização de biomateriais de origem vegetal no tingimento têxtil pode reduzir significativamente o impacto ambiental da indústria, promovendo simultaneamente a valorização de resíduos agroindustriais e da biodiversidade regional (Lima et al., 2026).

Historicamente, os corantes naturais foram amplamente utilizados por diferentes civilizações antes da consolidação da indústria petroquímica no século XIX. Entretanto, o advento dos corantes sintéticos levou ao declínio de sua aplicação industrial devido à maior estabilidade, padronização e ampla gama cromática dos compostos artificiais. Atualmente, contudo, o avanço das pesquisas em sustentabilidade tem impulsionado uma revalorização dos pigmentos naturais, especialmente em aplicações têxteis de menor impacto ambiental. Além do potencial tintorial, muitos extratos vegetais apresentam propriedades bioativas, incluindo ação antioxidante, antimicrobiana e fotoprotetora, agregando funcionalidades adicionais aos materiais têxteis (Benli, 2024).

Entre as principais limitações técnicas dos corantes naturais destaca-se a baixa afinidade com fibras celulósicas, como o algodão, resultando frequentemente em reduzida intensidade colorística e baixa solidez à lavagem e à fricção. Essas dificuldades estão

associadas à limitada formação de ligações químicas estáveis entre os compostos corantes e a estrutura celulósica das fibras. Em razão disso, a utilização de mordentes torna-se essencial para melhorar a fixação do corante e aumentar a durabilidade da coloração obtida (Benli, 2024).

Tradicionalmente, sais metálicos como sulfato de alumínio, cobre e ferro são utilizados como mordentes em processos de tingimento natural. Embora eficientes, esses compostos podem apresentar elevada toxicidade ambiental e riscos à saúde humana, especialmente devido ao acúmulo de metais pesados nos efluentes têxteis. Em resposta a essa problemática, pesquisas recentes têm direcionado atenção ao desenvolvimento de biomordentes, definidos como substâncias naturais capazes de atuar como agentes de fixação ecologicamente seguros (Benli, 2024).

Os biomordentes são geralmente obtidos a partir de resíduos vegetais ricos em compostos fenólicos, flavonoides e taninos, capazes de promover interações intermoleculares entre os corantes naturais e as fibras têxteis. Cascas de romã, resíduos de café, sementes, folhas e diferentes subprodutos agroindustriais têm demonstrado elevada eficiência como biomordentes sustentáveis. Além de favorecerem maior fixação dos corantes, esses materiais podem modificar tonalidades, intensificar a saturação das cores e melhorar propriedades de solidez sem a necessidade de produtos químicos agressivos ao ambiente (Lima *et al.*, 2026; Pranta e Rahaman, 2024).

Além da eficiência técnica, o uso de biomordentes relaciona-se diretamente aos princípios da bioeconomia e da economia circular, uma vez que possibilita o aproveitamento de resíduos vegetais abundantes e frequentemente descartados sem aproveitamento industrial. A valorização de resíduos agroindustriais como fontes de biomordentes e corantes naturais representa uma estratégia importante para redução de impactos ambientais e desenvolvimento de tecnologias limpas aplicáveis à indústria têxtil. No contexto brasileiro, essa abordagem torna-se ainda mais relevante devido à ampla biodiversidade vegetal existente e ao potencial de exploração sustentável de espécies nativas para aplicações tintoriais (Lima *et al.*, 2026).

Dessa forma, torna-se fundamental ampliar os estudos voltados à aplicação de biomordentes em processos de tingimento natural, especialmente em substratos celulósicos como o algodão, amplamente utilizado pela indústria têxtil. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a influência da utilização dos biomordentes vegetais casca

de angico vermelho e casca de romã no tingimento de tecidos de algodão com corantes naturais, analisando parâmetros relacionados à intensidade colorística, coordenadas colorimétricas e propriedades de solidez à lavagem e à fricção. Busca-se, assim, contribuir para o desenvolvimento de processos de tingimento mais sustentáveis, eficientes e alinhados às demandas ambientais contemporâneas.

2. METODOLOGIA

2.1. MATERIAIS E REAGENTES

Tecido plano 100% algodão alvejado foi utilizado. Para a obtenção dos extratos de corante para o tingimento foram utilizadas a cúrcuma, catuaba, cascas de jabuticaba e cascas de cebola. Cascas de angico e de romã foram utilizadas como biomordentes. O detergente não-iônico Nionlab Celm foi aplicado na lavagem dos tecidos após o tingimento e nos ensaios de solidez à lavagem.

2.2. SELEÇÃO DOS CORANTES NATURAIS E BIOMORDENTES

Com o objetivo de melhorar as propriedades de solidez e desenvolver tingimentos com diferentes tonalidades, foram selecionados corantes e mordentes de origem vegetal, de custo acessível, facilmente disponíveis e ecologicamente seguros para a aplicação nos processos de tingimento. A Tabela 1 apresenta os detalhes dos corantes pré-selecionados, incluindo nomes e nome científico, partes da planta utilizadas na extração dos corantes e quais cores podem ser obtidas a partir deles.

Tabela 1 – Descrição dos corantes naturais utilizados

Corante	Nome Científico	Cor	Parte da planta
Cúrcuma	<i>Curcuma longa</i> L.	Amarelo	Rizomas
Catuaba	<i>Anemopaegma</i>	Laranja	Casca
Jabuticaba	<i>Plinia trunciflora</i>	Caqui	Casca
Cebola	<i>Allium cepa</i>	Castanho	Casca

A escolha desses corantes visou garantir uma ampla gama de opções de coloração para os tecidos de algodão. Os biomordentes testados foram a casca de romã (*Punica granatum* L.) e a casca de angico vermelho (*Anadenanthera macrocarpa*).

2.3. EXTRAÇÃO DO CORANTES E BIOMORDENTES

Os extratos foram obtidos em meio aquoso, sem a adição de produtos químicos. As matérias-primas utilizadas para a extração foram, primeiramente, desidratadas por meio de secagem e em seguida trituradas.

Os extratos foram preparados em concentrações pré-determinadas de 30 gramas de corantes para 1 litro de banho, misturando a matéria corante desidratada em água destilada, aquecendo até a temperatura de 90°C e mantendo nessas condições durante 60 minutos. Por fim, as soluções foram filtradas obtendo-se dessa forma os extratos de corante a serem utilizados no tingimento. Os extratos utilizados como biomordentes foram extraídos de forma análoga, utilizando a concentração de 15 gramas para 1 litro de água destilada.

2.4. PROCESSO DE PRÉ-MORDENTAGEM

A pré-mordentagem foi realizada com uma concentração de 15 gL⁻¹, com uma relação de banho de 1:100, temperatura de 90°C durante um período de 60 minutos na máquina de tingimento Kimak AT1-SW. Posteriormente, as amostras foram lavadas em água corrente e secas à temperatura ambiente.

2.5. PROCESSO DE TINGIMENTO

Os tecidos de algodão com e sem pré-mordentagem foram tingidos com os extratos naturais, utilizando uma relação de banho de 1:100, temperatura de 90 °C, durante 60 minutos. As cores obtidas foram avaliadas utilizando o sistema CIELab e os rendimentos foram obtidos através do cálculo da força colorística (K/S), por meio da aplicação da equação de Kubelka-Munk (Eq.1) aos dados fornecidos pelos respectivos espectros de refletância, previamente, adquiridos com o espectrofotômetro de reflexão na região visível do espectro eletromagnético (400-700 nm).

$$\frac{K}{S} = \frac{(1 - R)^2}{2R} \quad (1)$$

Onde, R = refletância difusa, K = coeficiente de absorção, S = coeficiente de dispersão.

Uma vez que a tonalidade das amostras tingidas muda de acordo com as condições de tingimento, a intensidade da cor (I) também foi calculada, de acordo com a Equação (2), conforme descrito por Štěpánková (Štěpánková, Wiener e Rusinová, 2011).

$$I = \sum_{\lambda=400 \text{ nm}}^{\lambda=700 \text{ nm}} \frac{K}{S}(\lambda) * \Delta\lambda \quad \Delta\lambda = 10 \quad (2)$$

2.6. ENSAIOS DE SOLIDEZ À LAVAGEM

As amostras tingidas e selecionadas foram submetidas ao teste de solidez à lavagem de acordo com os procedimentos descritos na norma ISO 105-C06:2010 - Ciclo A1S. A avaliação da alteração de cor e manchamento foi realizada por meio da escala cinza numa cabine de luz, sob o iluminante D65.

2.7. ENSAIOS DE SOLIDEZ À FRICÇÃO

Os ensaios de solidez à fricção a seco e a úmido foram realizados em conformidade com a norma ISO 105-X12:2016, utilizando o equipamento Crockmeter. Cada amostra selecionada foi friccionada contra um tecido testemunho de algodão durante dez ciclos, em estado seco e úmido. Os resultados foram avaliados através da escala cinza, numa cabine de luz, sob o iluminante D65.

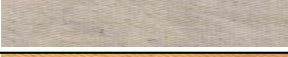
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. PRÉ-MORDENTAGEM E TINGIMENTO DAS AMOSTRAS

A Tabela 2 apresenta a lista dos biomordentes e corantes testados, bem como as cores obtidas com os respectivos valores de intensidade (I) e as coordenadas de cor CIELab dos tecidos tingidos. Os biomordentes e corantes testados, produziram quatro colorações diferentes, sendo amarelo, rosa claro, cinza e marrom.

Os resultados obtidos demonstram que o uso de biomordentes influenciou significativamente as propriedades colorimétricas dos tecidos tingidos. A redução nos valores de L* indica que os biomordentes promoveram um escurecimento das amostras, resultando em cores mais saturadas e intensas, conforme evidenciado pelo aumento do índice de intensidade (I). Por sua vez, as alterações nas coordenadas a* e b* refletem mudanças nas tonalidades, sugerindo que ocorre interações específicas entre corantes e biomordentes (Rahman et al., 2025).

Tabela 2 - Intensidade de cor (I) e coordenadas CIELab de tecidos de algodão tingidos com e sem a utilização de biomordentes

Corante	Biomordente	Cor	L*	a*	b*	I
Cúrcuma	***		84,66	4,32	80,1	490,67
	Casca de angico		79,83	1,63	69,78	489,53
	Casca de romã		78,10	1,49	67,17	493,09
Catuaba	***		75,87	10,8	17,1	98,85
	Casca de angico		75,78	5,74	27,31	135,34
	Casca de romã		73,52	10,13	16,78	119,26
Jabuticaba	***		67,22	1,84	8,21	167,00
	Casca de angico		66,75	1,24	9,03	177,84
	Casca de romã		62,67	1,83	5,53	224,92
Cebola	***		67,11	11,36	19,96	211,54
	Casca de angico		57,81	11,11	20,98	417,08
	Casca de romã		55,10	14,35	18,42	472,77

As combinações de corante e biomordentes apresentaram resultados únicos. A cúrcuma e o angico, por exemplo, reduziram a intensidade amarela do tecido, enquanto a jabuticaba, resultou em cores mais acinzentadas, indicando a formação de complexos distintos.

3.2. ENSAIOS DE SOLIDEZ À LAVAGEM E À FRICÇÃO

A avaliação dos ensaios de solidez à lavagem e à fricção foi realizada com base em uma escala de notas que varia de 1 a 5. Nesta escala, a nota 1 indica uma alteração ou transferência significativa de cor, enquanto a nota 5 indica nenhuma alteração ou transferência perceptível. Os resultados obtidos para as diferentes combinações de corante e biomordente estão apresentados na Tabela 3.

De maneira geral, a maioria dos corantes naturais apresentou boa ou excelente solidez à lavagem, com exceção da cúrcuma, que apresentou baixos índices de solidez ao manchamento no algodão. Contudo, o uso de biomordentes melhorou a resistência da cor, tanto na sua alteração quanto na capacidade de manchar outros tecidos. Resultados semelhantes foram reportados por Rahman *et al.*, (2025) para o tingimento de algodão com o corante natural de cúrcuma utilizando diferentes tipos de biomordentes.

Tabela 3 - Ensaios de solidez à lavagem e à fricção das amostras tingidas com os corantes com e sem a aplicação dos biomordentes

Corante	Biomordente	Solidez à lavagem		
		Alteração	Manchamento	
			Algodão	Lã
Cúrcuma	***	3-4	1-2	4-5
	Casca de angico	4	3	4-5
	Casca de romã	4	2-3	4-5
Catuaba	***	4	4-5	4-5
	Casca de angico	4	4-5	4-5
	Casca de romã	4	5	4-5
Jabuticaba	***	4	4-5	4
	Casca de angico	4-5	4-5	4-5
	Casca de romã	4-5	4-5	4-5
Cebola	***	4	3-4	4
	Casca de angico	4	4-5	4
	Casca de romã	4-5	4-5	4-5

Em termos de solidez à fricção, os resultados indicam que a maioria dos corantes testados tem excelente resistência tanto em condições secas quanto úmidas, com notas variando de 4 a 5.

4. CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que os biomordentes são eficazes na melhoria da fixação de corantes naturais em tecidos de algodão, influenciando significativamente as propriedades colorimétricas e a intensidade das cores obtidas. A utilização das cascas de angico vermelho e de romã promoveu alterações nas coordenadas CIELab, resultando em tonalidades mais intensas e saturadas, além de contribuir para a redução da luminosidade das amostras tingidas. Os ensaios de solidez à lavagem e à fricção evidenciaram que a maioria dos corantes avaliados apresentou desempenho satisfatório, especialmente quando associados aos biomordentes, indicando maior estabilidade da coloração e menor transferência de cor para tecidos adjacentes. Dessa forma, a aplicação de biomordentes consolida-se como uma solução promissora e sustentável para o tingimento têxtil, contribuindo para a redução do impacto ambiental da indústria.

REFERÊNCIAS

- BENLI, H. Bio-mordants: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, p. 20714–20771, 2024.
- LIMA, M. M. *et al.* Tingimento Natural e a Biodiversidade Brasileira: Desafios e Oportunidades, uma revisão sistemática. **Revista NAVA**, p. 1–24, 2026.
- PONTES, V. *et al.* Algae-powered innovation : A critical review of sustainable textile dyeing and functionalization strategies. **Materials Today Sustainability**, v. 31, n. April, 2025.
- PRANTA, A. D.; RAHAMAN, M. T. Extraction of eco-friendly natural dyes and biomordants for textile coloration: A critical review. **Nano-Structures & Nano-Objects**, v. 39, p. 101243, 1 set. 2024.
- RAHMAN, M. M. *et al.* Enhancing the Dyeing and Color Fastness Properties of Cotton Fabric Dyed with Curcumin: A Sustainable Double Mordanting Approach Using Waste-Derived Biomordants. **Fibers and Polymers**, v. 26, n. 9, p. 3963–3979, 2025.
- ŠTĚPÁNKOVÁ, M.; WIENER, J.; RUSINOVÁ, K. Decolourization of vat dyes on cotton fabric with infrared laser light. **Cellulose**, v. 18, n. 2, p. 469–478, 2011.

CAPÍTULO XXIV

O ENSINO DE QUÍMICA COMO FERRAMENTA PARA A SUSTENTABILIDADE: DISCUTINDO POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E MODELOS ECONÔMICOS

CHEMISTRY EDUCATION AS A TOOL FOR SUSTAINABILITY: DISCUSSING AIR POLLUTION AND ECONOMIC MODELS

DOI: 10.51859/amplla.mac6200-24

Maria Vitória Soares Moura¹
Andréia Charlene Sousa G. A. Silva¹
Luís Gustavo Cardoso A. Silva¹
Rafael da Silva Nascimento¹
Marta Sandrielly da Silva Sousa¹
Marly Lopes de Oliveira²

¹Graduandos do Curso de Licenciatura em Química na Universidade Estadual do Piauí – UESPI

²Docente do Curso de Química da Universidade Estadual do Piauí – UESPI

RESUMO

O capítulo aborda a relação entre Química Ambiental, sustentabilidade e educação científica, discutindo os impactos da poluição atmosférica causada pelas atividades humanas e pelo modelo econômico tradicional. O texto destaca a emissão de gases poluentes, como CO₂, CH₄ e CO, responsáveis pelo efeito estufa, aquecimento global e diversos problemas socioambientais, além de apresentar consequências como mudanças climáticas, degradação ambiental, doenças respiratórias e perda da biodiversidade. Os gráficos históricos demonstraram o aumento das emissões após a Revolução Industrial e abordaram o fenômeno do desacoplamento econômico, atestando a possibilidade de conciliar crescimento econômico e redução dos impactos ambientais por meio de processos ecoeficientes. Além disso, apresenta a Química Verde como alternativa ao modelo industrial tradicional, propondo processos menos poluentes e mais eficientes ambientalmente.

Palavras-chave: Química ambiental. Sustentabilidade. Educação Científica.

ABSTRACT

The chapter addresses the relationship between Environmental Chemistry, sustainability, and science education, discussing the impacts of atmospheric pollution caused by human activities and the traditional economic model. The text highlights the emission of polluting gases, such as (CO₂), (CH₄), and (CO), which are responsible for the greenhouse effect, global warming, and various socio-environmental problems, in addition to presenting consequences such as climate change, environmental degradation, respiratory diseases, and biodiversity loss. The study also utilizes historical charts to demonstrate the increase in emissions after the Industrial Revolution and addresses the phenomenon of decoupling, evidencing the possibility of reconciling economic growth and the reduction of environmental impacts. Furthermore, it presents Green Chemistry as an alternative to the traditional industrial model, proposing processes that are less polluting and more environmentally efficient.

Keywords: Environmental chemistry. Sustainability. Science education.

1. INTRODUÇÃO

Um princípio ontológico e epistemológico fundamental para a compreensão e a aplicabilidade da sustentabilidade na sociedade contemporânea reside no estudo aprofundado da Química Ambiental. Esta vertente científica e transdisciplinar consiste em investigar e compreender as intrínsecas relações, os mecanismos cinéticos, os ciclos biogeoquímicos e os fenômenos reacionais que ocorrem na biosfera, os quais podem ser desencadeados tanto por processos biogeoquímicos naturais quanto por intensas intervenções antrópicas.¹ No ecossistema educacional, a inserção dessa temática nos currículos formativos propicia uma leitura crítica e reflexiva da realidade, permitindo que os estudantes superem a mera memorização mecânica de fórmulas lineares e nomenclaturas abstratas. Através dessa abordagem, estimula-se a correlação direta entre a ciência macromolecular e as transformações termodinâmicas globais decorrentes do desenvolvimento civilizatório e industrial.²

Historicamente, o desencadeamento e a solidificação dos principais desequilíbrios atmosféricos que testemunhamos na atualidade remontam ao surgimento da Revolução Industrial, iniciada na Inglaterra na segunda metade do século XVIII. Este período representou um marco divisório irreversível na relação entre o metabolismo social da humanidade e os limites biofísicos da natureza, contribuindo significativamente para o agravamento da poluição do ar em escala planetária.³

A aceleração econômica e a consolidação do modo de produção capitalista industrial fundamentaram-se no aumento exponencial da queima de combustíveis fósseis. Carvão mineral, e posteriormente o petróleo e o gás natural, consolidaram-se como os pilares energéticos da matriz global. Trata-se de recursos energéticos não renováveis originados a partir da lenta diagênese e decomposição anaeróbica de matéria orgânica carbonácea ao longo de eras geológicas.⁴ Consequentemente, a combustão estequiométrica e incompleta desses recursos ricos em carbono libera subprodutos altamente impactantes na troposfera e na estratosfera, destacando-se o dióxido de carbono (CO_2) e o gás metano (CH_4), os principais agentes forçadores radiativos que intensificam o efeito estufa antropogênico e impulsionam o aquecimento global.⁵

Diante desse panorama de severa degradação ecológica e climática, o Ensino de Química emerge não apenas como um repositório de conceitos técnicos, mas como uma

ferramenta político-pedagógica indispensável para propor reflexões, mitigações e melhorias voltadas ao desenvolvimento sustentável. Na contemporaneidade, a prática docente enfrenta o complexo desafio de confrontar cenários macroeconômicos marcados pela negligência corporativa, pelo *greenwashing* e pela baixa conscientização social acerca da gravidade das emissões de gases poluentes e compostos xenobióticos.⁶ Portanto, contextualizar as dinâmicas químicas sob a ótica da abordagem CTSA (Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente) capacita os educandos a interpretar as contradições estruturais entre o crescimento econômico tradicional, linear e infinito, e os limites ecológicos de um planeta finito. Essa ruptura epistemológica é essencial para desconstruir a inércia social e a passividade cognitiva que perpetuam esses problemas crônicos na população.⁷

Sob a égide da alfabetização científica e tecnológica, a aquisição de conhecimentos químicos relacionados às causas moleculares e às consequências macroestruturais da poluição atmosférica constitui um direito fundamental para o exercício da cidadania plena. Essa bagagem teórica, metodológica e reflexiva não apenas subsidia a elaboração de estratégias tecnológicas mitigadoras, baseadas nos princípios da Química Verde e da ecoeficiência, mas também serve de alicerce para a formação de indivíduos comprometidos, críticos e corresponsáveis pela governança ambiental e pela manutenção do futuro da vida no antropoceno.⁸ Espera-se, assim, que a educação científica atue como um vetor de emancipação dos sujeitos, transformando a sala de aula em um espaço de agência social orientado à sustentabilidade e à justiça climática.

Com o intuito de adensar teoricamente essa problemática e fornecer subsídios didático-pedagógicos para o debate e a práxis em sala de aula, este capítulo de livro encontra-se estruturado em seções complementares e interdependentes. Inicialmente, discute-se a poluição atmosférica de origem antrópica sob a perspectiva crítica da economia ortodoxa, contrapondo o imperativo da acumulação de capital e do lucro financeiro à integridade termodinâmica dos ecossistemas.⁹ Em seguida, realiza-se um detalhamento químico e molecular dos principais gases poluentes a partir da análise empírica de dados e recursos gráficos históricos de relevância global, tais como a célebre Curva de Keeling e o fenômeno contemporâneo do desacoplamento econômico. Por fim, delineiam-se caminhos metodológicos, transdisciplinares e direcionamentos pedagógicos que visam articular esses saberes químicos, econômicos e ecológicos no espaço da educação básica e superior,

consolidando o Ensino de Química como um agente transformador da realidade socioambiental.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA DE ORIGEM ANTRÓPICA E SUA ANÁLISE SOB A PERSPECTIVA DA ECONOMIA ORTODOXA.

Na obra teórica de referência Economia Socioambiental, o agrônomo e economista brasileiro José Eli da Veiga¹⁰ constrói uma crítica contundente e epistemologicamente fundamentada ao modelo econômico tradicional e hegemônico. Segundo o autor, a economia ortodoxa — de matriz eminentemente neoclássica — opera sob um reducionismo metodológico que tende a priorizar a maximização dos lucros, a eficiência alocativa de mercado a curto prazo e o crescimento infinito do Produto Interno Bruto (PIB). O erro crônico dessa abordagem reside no fato de desconsiderar que o subsistema econômico não é isolado, mas sim um sistema aberto que depende e opera estritamente dentro de um sistema biofísico maior, complexo, finito e termodinamicamente limitado: a biosfera.

Sob essa ótica linear de produção e consumo (extrair-produzir-descartar), os recursos naturais são frequentemente tratados como externalidades inesgotáveis e os sumidouros planetários são utilizados de forma predatória. Os rejeitos gasosos, particulados e efluentes resultantes da atividade industrial em larga escala são sistematicamente negligenciados pela contabilidade tradicional, gerando aquilo que a economia ecológica classifica como externalidades negativas. Essas externalidades representam custos socioambientais reais que não são incorporados aos balanços financeiros corporativos, sendo, ao contrário, socializados com a população e transferidos de forma injusta para as futuras gerações.

Historicamente, a gênese desse modelo de exploração antrópica e degradação intensiva coincide com o advento da Revolução Industrial, cujo marco inicial consolidou-se na Inglaterra por volta de 1760. Este período de transição técnico-científica e de reestruturação profunda nas forças produtivas representou uma ruptura metabólica na relação entre a humanidade e a natureza. A introdução da maquinofatura, a divisão social do trabalho e o surgimento das primeiras indústrias impulsionaram uma rápida urbanização global e a consolidação de uma nova classe detentora dos meios de produção: a burguesia industrial.¹¹

Contudo, essa aceleração produtiva fundamentou-se em uma transição energética

radical: a substituição da força motriz orgânica (humana, animal, hidráulica e eólica) pela energia mecânica gerada pela queima de combustíveis fósseis, inicialmente o carvão mineral. Com a proliferação das chaminés fabris e o crescimento das cidades industriais, a atmosfera troposférica passou a ser saturada por fumaça, fuligem e gases tóxicos, inaugurando o que muitos teóricos contemporâneos denominam de Capitaloceno — a era em que a lógica da acumulação de capital altera os fluxos biogeoquímicos do planeta.

No cenário contemporâneo, essa lógica produtivista e mercantilista perpetua-se de forma agravada e globalizada. Os interesses econômicos imediatos de conglomerados industriais, do setor de combustíveis fósseis e do agronegócio sobrepõem-se, frequentemente, à urgência da conscientização ecológica e à governança climática global.¹² Mesmo diante de evidências científicas irrefutáveis de que as emissões antrópicas impactam diretamente a saúde pública, desestabilizam o clima por meio do forçamento radiativo e ameaçam a biodiversidade, a racionalidade econômica ortodoxa resiste em internalizar os limites ecológicos em suas funções de produção.

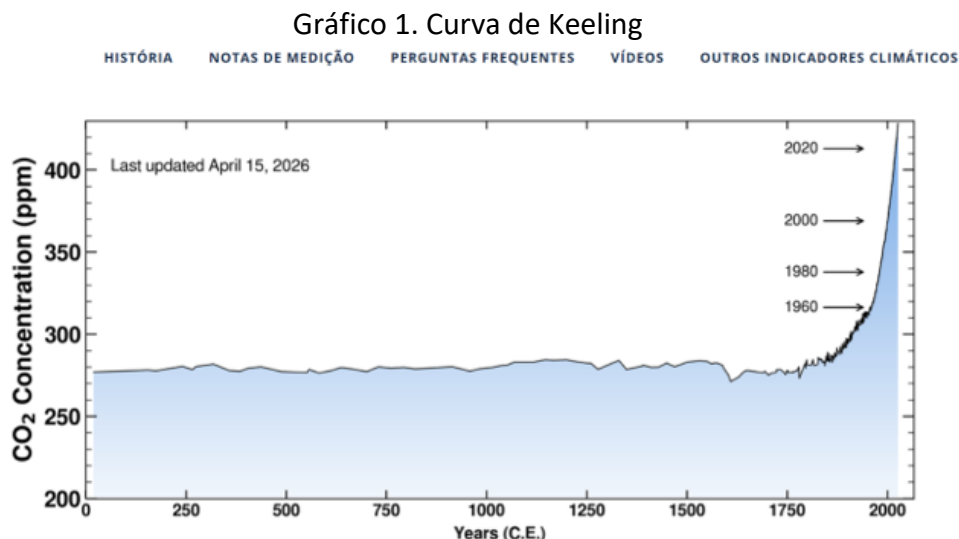
No entanto, o avanço da ciência e o debate socioambiental contemporâneo demonstram que existem alternativas viáveis a esse paradigma predatório. Por meio da transição para matrizes energéticas limpas e renováveis, do fortalecimento da economia circular e da aplicação rigorosa dos preceitos da Química Verde e da ecoeficiência industrial, torna-se perfeitamente possível dissociar o bem-estar social da degradação ecológica.¹³

2.1.1. A Poluição do Ar

O monóxido de carbono (CO) é um dos principais agentes da poluição do ar, enquanto o dióxido de carbono (CO₂) se destaca por sua contribuição para o efeito estufa e o aquecimento global. Ambos são resultantes da queima de carvão mineral, petróleo e gás natural. Já o metano (CH₄) é um gás poluente liberado através do processo de digestão, agropecuária, decomposição, além de estar associado ao petróleo.

Ao atingirem a atmosfera, esses gases absorvem radiação infravermelha, o que aumenta a vibração de suas moléculas e permite a retenção de energia térmica de modo que parte desse calor retorne à superfície terrestre causando as altas temperaturas. O dióxido de enxofre (SO₂) e o óxido de nitrogênio (NO) estão entre os principais causadores da formação de chuva ácida. A camada de ozônio atua como filtro de raios ultravioletas e ao ser degradada, permite que esses raios atinjam a Terra causando sérios riscos à saúde como o câncer de pele.

Além disso, o clorofluorcarboneto (CFC) e os hidrocarbonetos aromáticos são elementos tóxicos carcinogênicos e poluentes. O Gráfico 1 abaixo, denominado Curva de Keeling, demonstra o registro de CO₂ na atmosfera:



Fonte: UC San Diego - Scripps Institution of Oceanography (2026); Curva de Keeling (2026) - The Keeling Curve <disponível em keelingcurve.ucsd.edu> Acesso: 17 de abril de 2026

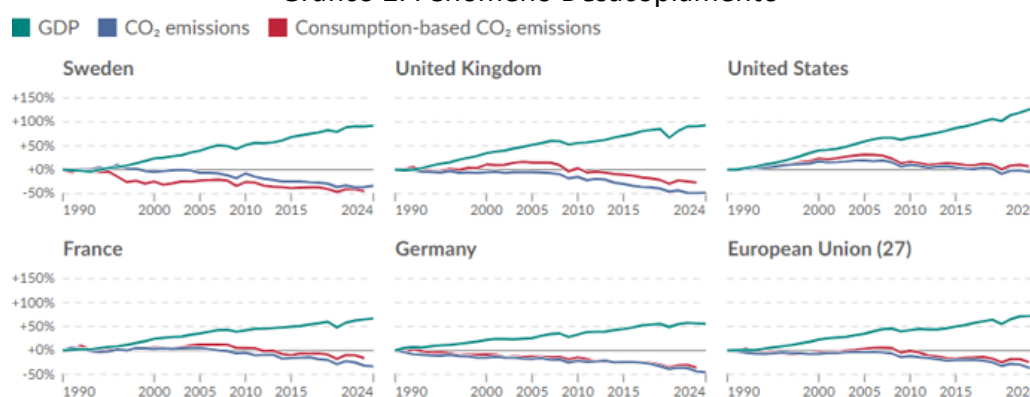
Observa-se no Gráfico 1 que, do ano 0 até 1750, a linha permanece quase constante, oscilando um pouco abaixo dos 280 ppm (partes por milhão) de concentração de CO₂. A partir do século XVIII, a concentração de dióxido de carbono aumentou significativamente a cada ano, até os dias atuais. À medida que se chega nos anos 2000, a curva vai ficando mais inclinada. Isso demonstra que a economia tradicional acelerou o consumo de recursos de tal forma que, em menos de 200 anos, alterou - se a composição da atmosfera mais do que 2000 anos anteriores.

2.1.2. Consequências da poluição antropogênica causada pela economia tradicional

A crítica à economia ortodoxa torna-se fundamental, uma vez que esse modelo econômico tradicional prioriza o crescimento contínuo da produção e do lucro, muitas vezes desconsiderando os limites ecológicos do planeta. Como resultado, há uma exploração intensa dos recursos naturais e uma externalização dos custos ambientais, ou seja, os danos causados à natureza não são devidamente incorporados ao sistema econômico.¹⁴ Essa lógica contribui para a manutenção de práticas produtivas poluentes, já que o sucesso econômico é frequentemente medido apenas por indicadores financeiros, como o Produto Interno Bruto (PIB), sem considerar os impactos socioambientais.

O Gráfico 2 demonstra ser um fenômeno conhecido como Desacoplamento. A linha verde representa o PIB (Produto Interno Bruto) e as linhas azul e vermelha representam as emissões de CO₂. O gráfico mostra que, em países desenvolvidos (como Suécia, Reino Unido, EUA, França e Alemanha), o PIB continuou a crescer significativamente a partir de 1990, enquanto as emissões de carbono nesses países começaram a cair. Isso porque alternativas sustentáveis começaram a surgir na década de 90 e os países conhecidos como desenvolvidos e subdesenvolvidos já possuíam o conhecimento de práticas que pudessem reduzir a emissão de gases poluentes no ar, visto que, o cenário tornou - se desafiador e preocupante para os cientistas, devido às consequências naturais do aquecimento global e da exploração de recursos.¹⁰ Dessa forma, isso evidencia-se que, por meio de soluções e práticas coletivas, é possível produzir sem afetar os biomas naturais da Terra.

Gráfico 2. Fenômeno Desacoplamento



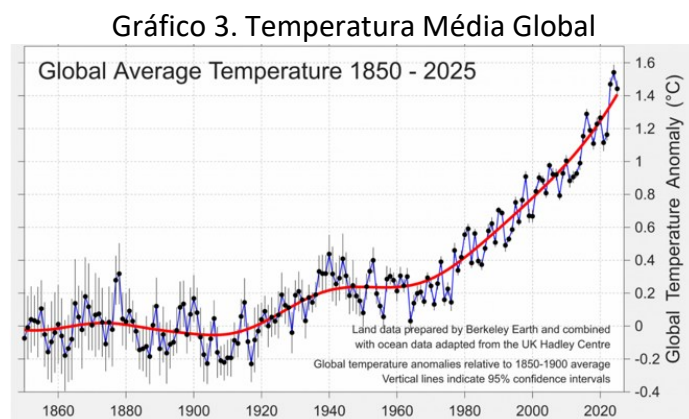
Fonte: Eurostat, OCDE, FMI e Banco Mundial (2026); Orçamento Global de Carbono (2025) - Our World in Data.

2.1.3. Consequências socioambientais da poluição

Na contemporaneidade, o desequilíbrio ambiental, como a poluição atmosférica causada pelo ser humano, tem sido, há muito tempo, um grande problema para a sociedade, pois vem provocando diversas doenças respiratórias, cardiovasculares, câncer de pulmão e pele. Essas ações prejudiciais podem ser observadas em três principais eventos. O primeiro é o aquecimento global, como já mencionado, no qual o ser humano contribui para o aumento excessivo do efeito estufa, ocasionando o acúmulo diário de gás carbônico (CO₂), que fica retido na atmosfera do planeta Terra. Além disso, parte desse gás é absorvida pelos oceanos, causando desequilíbrios ambientais e podendo levar à morte de diversos organismos por asfixia.

Outro fenômeno bastante conhecido é a presença de substâncias não biodegradáveis, como os resíduos provenientes da queima do petróleo, que podem conter mercúrio. Esse elemento, muitas vezes descartado em lagos por atividades industriais, resulta em sua acumulação na cadeia alimentar, em vez de ser degradado por microrganismos, como as cianobactérias. O aquecimento global causa eventos climáticos desproporcionais, como o aumento da temperatura, derretimento de geleiras nos polos mais frios, extinção de animais e vegetais, inundações, seca, entre outros.

De acordo com o Gráfico 3, Temperatura Média Global, evidencia - se que os anos abaixo do ponto “0” são os mais frios, enquanto os que estão acima de 0, são os que possuem a temperatura mais elevada. A linha vermelha suaviza as variações anuais e mostra a tendência real: a partir de 1920, a temperatura começa a subir, mas a variação para o nível mais elevado ocorre mesmo após 1980. Hoje, a Terra está cerca de 1.4°C a 1.6°C mais quente do que na era pré-industrial.



Fonte: Robert Rohde (2026); Temperatura Média Global (2026) - Berkeley Earth < disponível em <https://berkeleyearth.org> > Acesso: 17 de abril de 2026.

2.1.4. A Química Verde como Contraponto Paradigmático ao Modelo Tradicional e o Fenômeno do Desacoplamento

Como alternativa técnica, epistemológica e metodológica à racionalidade predatória da economia ortodoxa, emerge o paradigma da Química Verde (Green Chemistry). Formulado pioneiramente por Paul Anastas e John C. Warner ¹, este conceito é definido como o design, o desenvolvimento e a implementação de produtos e processos químicos que visam reduzir ou eliminar a utilização e a geração de substâncias perigosas à saúde humana e ao meio ambiente. Longe de ser apenas uma abordagem paliativa de remediação de fim de tubo (*end-*

of-pipe), a Química Verde reconfigura a própria essência da prática industrial a partir de doze princípios fundamentais. Estes pilares preconizam a prevenção primária da formação de resíduos, a economia atômica (maximizando a incorporação de todos os reagentes no produto final), a utilização de matérias-primas e solventes de origem renovável, a busca pela eficiência energética por meio de processos que operem em condições ambientes de temperatura e pressão, e a substituição de catalisadores estequiométricos por sistemas catalíticos altamente seletivos e reutilizáveis.¹⁵

A inserção da Química Verde no cenário macroeconômico atua em oposição direta à lógica clássica e neoclássica discutida por José Eli da Veiga (2010). Ao internalizar o equilíbrio termodinâmico e a conservação da biosfera no cerne do planejamento industrial, essa abordagem desconstrói o dogma financeiro que assume a indissociabilidade entre o progresso material e a degradação dos ecossistemas. Historicamente, os tomadores de decisão operaram sob o pressuposto de que investimentos em mitigação ambiental representariam prejuízos marginais e perdas de competitividade. A Química Verde subverte esse ecocídio sistêmico ao provar que a ecoeficiência (como a redução do Fator E de resíduos e a transição para biorrefinarias e insumos biodegradáveis) pode diminuir os custos operacionais de produção a médio e longo prazo, aliando a viabilidade técnica à proteção social dos problemas antropogênicos.¹⁶

Essa convergência de interesses encontra amparo analítico no fenômeno contemporâneo do Desacoplamento (Decoupling), o qual evidencia empiricamente a possibilidade de dissociar a curva de crescimento econômico (medida pelo PIB) da curva de pressões ambientais e emissões de gases de efeito estufa. O desacoplamento pode manifestar-se de forma relativa — quando os indicadores ambientais crescem a uma taxa inferior à do crescimento econômico — ou, idealmente, de forma absoluta, cenário no qual o PIB continua a se expandir enquanto as emissões líquidas de poluentes decrescem de forma contínua. Para que o desacoplamento absoluto migre de uma excepcionalidade de nações pós-industriais para uma realidade global, estratégias de reengenharia molecular fundamentadas na Química Verde deixam de ser uma escolha corporativa voluntária e passam a ser uma exigência civilizatória estrutural, servindo de base para o delineamento de novas políticas educacionais e tecnológicas sustentáveis.

2.1.5. Inércia Social e os Desafios de sua Superação na Práxis Educativa

A dissociação crônica entre o progresso científico-tecnológico e a conscientização coletiva reflete um fenômeno complexo conhecido como inércia social. No campo ambiental, esse comportamento caracteriza-se pela passividade e pela resistência da sociedade em modificar hábitos predatórios e adotar práticas efetivamente sustentáveis, mesmo diante de um volume massivo de informações sobre o colapso climático. Compreender a raiz dessa inércia evoca as premissas epistemológicas da renomada biofísica e química britânica Rosalind Franklin, que, em correspondência datada de 1940, sintetizou de forma atemporal: *“A ciência e a vida cotidiana não podem e não devem ser separadas”*⁷. A defesa de Franklin pelo estudo da ciência não se limitava ao isolamento dos laboratórios; visava à compreensão sistemática do mundo, dos processos naturais e cosmológicos de forma intrinsecamente conectada à realidade social.

No panorama contemporâneo, observa-se uma aparente contradição: os jovens demonstram expressivo interesse pelas descobertas científicas e pelas mídias tecnológicas, contudo, há um déficit estrutural na transição desse interesse para ações concretas de engajamento social. A mera difusão de dados técnicos não tem se mostrado suficiente para revigorar a cidadania e desencadear a responsabilidade ambiental necessária para mitigar a poluição antrópica. É precisamente nesse hiato que o papel da educação científica emancipatória se faz urgente. O compromisso do Ensino de Química não deve ser apenas tornar a informação acessível, mas democratizar o conhecimento de forma que ele atue como um catalisador do pensamento crítico social, permitindo que o educando enxergue a ciência como parte viva e atuante de seu ecossistema cotidiano.

Sob essa perspectiva transformadora, a inserção dos princípios da Química Verde na Educação Básica e Superior ultrapassa o escopo puramente conceitual. Ela se constitui como uma proposta metodológica e ética projetada para formar cidadãos aptos a conectarem reações, estequiometrias e processos moleculares a problemas reais e urgentes da comunidade. Ao ancorar a prática pedagógica nos pressupostos da abordagem CTSA (Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente), o estudante é retirado da posição passiva de mero espectador ou consumidor da técnica. Ele passa a compreender como as decisões tecnocientíficas e os arranjos industriais geram desdobramentos diretos na saúde coletiva, na integridade planetária e no equilíbrio socioeconômico de sua região.^{8, 16}

Todavia, a efetivação dessa mudança paradigmática colide frontalmente com o desafio da superficialidade e do reducionismo que historicamente fragmentam os currículos escolares. Muitas vezes, a Química Ambiental e a sustentabilidade são abordadas de maneira lateral ou meramente ilustrativa, desprovidas de densidade reflexiva. Para que ocorra uma transição genuína de uma matriz socioeconômica tradicional e linear para um modelo sustentável e circular, é imperativo que o ensino de química adote práticas experimentais responsáveis e investigativas. A experimentação deve abandonar o modelo de "receita de bolo" e assumir o caráter de resolução de problemas socio-científicos, fazendo uso de reagentes de baixa toxicidade, resíduos minimizados (Fator E nulo) e matérias-primas renováveis. Somente por meio de uma ciência escolar acessível, ética e engajada, será possível romper a inércia social e instrumentalizar as novas gerações para a construção de um futuro termodinamicamente equilibrado e socialmente justo.

2.1.6. Causas da Estagnação Social perante o Meio Ambiente e a Racionalidade Consumista

A acomodação estrutural da sociedade contemporânea reflete uma forma sistemática de negligência frente às crises multifacetadas que permeiam as esferas econômica, política e socioambiental. Embora determinados ciclos climáticos globais possuam componentes geológicos e históricos, o consenso científico internacional reitera que o atual cenário de aquecimento global e colapso climático não decorre de dinâmicas naturais, mas constitui um fenômeno eminentemente antropogênico, catalisado pela emissão desenfreada de gases de efeito estufa. Nesse contexto, a população civil não apenas possui o dever ético, mas a capacidade de intervir significativamente para mitigar esses impactos e promover a sustentabilidade.

Todavia, a inércia social perpetua-se de forma silenciosa e paradoxal: enquanto o debate ecológico prolifera nos discursos institucionais e midiáticos, a transposição dessas discussões para a práxis cotidiana e para políticas públicas estruturantes permanece quase inexistente. Os reflexos dessa passividade coletiva emergem de maneira devastadora quando os limiares de resiliência dos ecossistemas são superados, manifestando-se em eventos climáticos extremos. No cenário brasileiro, essa realidade materializa-se tragicamente em desastres socioambientais recorrentes, tais como a catástrofe humanitária e ecológica das enchentes e inundações que assolaram o estado do Rio Grande do Sul, e o agravamento histórico das secas extremas e processos de desertificação no semiárido do Nordeste

brasileiro. Longe de serem fatalidades geográficas, tais episódios evidenciam a vulnerabilidade de um modelo civilizatório estagnado perante seus próprios impactos.

Para compreender as bases psicossociais e econômicas dessa estagnação, torna-se indispensável recorrer ao arcabouço teórico do sociólogo polonês Zygmunt Bauman², especificamente ao seu conceito fundamental de Modernidade Líquida. Segundo o autor, a contemporaneidade é marcada pela liquefação das instituições sólidas, dando lugar a relações políticas, sociais e econômicas fluidas, voláteis e superficiais. Sob a égide de uma globalização corporativa, a sociedade de produtores foi gradativamente substituída pela sociedade de consumidores, estabelecendo uma era em que, como preconiza Bauman², os objetos, os laços e os compromissos são projetados para não durarem.

Esse consumismo exacerbado e programado configura-se como um dos principais motores da poluição atmosférica e do esgotamento de recursos. A lógica do descarte rápido, alimentada pela obsolescência planejada e pelo desejo incessante de acumulação material de bens supérfluos, gera um fluxo contínuo de resíduos e demanda uma exploração termodinâmica cada vez mais intensiva da natureza. Com base nos maiores PIBs – EUA e China – que lideram o consumo global, tornam essencial adotar o desacoplamento para alinhar economia e sustentabilidade. No entanto, para evitar danos ambientais, a sociedade precisa adotar práticas conscientes, como evitar o desperdício de comida, reutilizar produtos e comprar apenas o necessário.¹²

Nesse contexto de flexibilização das questões ambientais, o Ensino de Química adquire relevância política e pedagógica fundamental. Em vez de apresentar reações químicas de forma abstrata e isolada, o educador deve utilizar os episódios das enchentes no Sul e das secas no Nordeste como temas geradores e disparadores de discussões CTSA. Ao analisar quimicamente o ciclo da água, as reações de combustão e o balanço energético global associados a esses desastres reais, a sala de aula se transforma em um espaço de desconstrução do fetiche do consumo líquido. Promover essa ponte entre a ciência molecular e a crítica sociológica de Bauman² é o caminho para romper a estagnação social, instrumentalizando a juventude para transitar da passividade consumista para a ação cidadã responsável.

3. CONCLUSÃO

A articulação teórica engendrada ao longo deste capítulo evidencia que a compreensão e o discernimento acerca da Química Ambiental são imperativos categóricos para decodificar as complexas interações entre as dinâmicas antrópicas, os ciclos biogeoquímicos naturais, as estruturas macroeconômicas e os sistemas educacionais contemporâneos.

A superação da crise ecológica e climática global requer mais do que diagnósticos técnicos; exige uma mudança comportamental e estrutural que perpassa desde ações mitigadoras no âmbito cotidiano até reformulações profundas nos modos de produção e consumo. No nível microsocial, práticas voltadas à redução na geração de resíduos sólidos, ao fortalecimento dos fluxos de reciclagem e à reutilização sistemática de materiais descartáveis constituem os primeiros passos para a mitigação do passivo ecológico urbano.

Adicionalmente, estratégias de engenharia ecológica, como o reflorestamento e o plantio planejado de espécimes arbóreas, consolidam-se como mecanismos biológicos indispensáveis para o sequestro antropogênico de carbono. Por meio da dinâmica fisiológica da fotossíntese, os organismos vegetais atuam como sumidouros naturais estáveis, assimilando o dióxido de carbono (CO_2) atmosférico e convertendo-o em biomassa lignocelulósica, com a subsequente liberação de oxigênio diatômico (O_2) para a troposfera. Paralelamente, a transição para modelos de mobilidade urbana ativa e sustentável — fundamentada na substituição do transporte individual motorizado por deslocamentos ciclovitários e pedestres em curtas distâncias — configura-se como uma medida urgente para a descentralização das emissões veiculares de óxidos de nitrogênio e monóxido de carbono nos grandes centros urbanos.

Todavia, para que essas ações individuais não sejam neutralizadas pela fluidez e pelo consumismo inerentes à modernidade líquida, torna-se imprescindível a adoção de macrodiretrizes tecnológicas e científicas disruptivas. Nesse cenário, o fenômeno do desacoplamento absoluto encontra na Química Verde sua principal ferramenta de viabilização operacional. Os doze princípios formulados por Anastas e Warner (1998) oferecem um roteiro rigoroso para subverter a lógica predatória da economia ortodoxa. A transição para matrizes energéticas limpas e renováveis, a maximização da economia atômica, o banimento de solventes halogenados e a implementação da economia circular e da catálise heterogênea

provam ser perfeitamente exequíveis. Esse novo paradigma industrial demonstra que é possível alinhar a redução de custos operacionais e o aumento da segurança do trabalho à integridade termodinâmica dos ecossistemas, desafiando a premissa de que o lucro corporativo deve se sobrepor à sustentabilidade da biosfera.

Cumprir destacar o papel central e estratégico desempenhado pela educação e pelo ensino científico nessa transição civilizatória. As propostas de intervenção e os caminhos metodológicos delineados neste estudo não decorrem de meras percepções subjetivas isoladas, mas emanam de uma sólida investigação fundamentada na alfabetização científica e na abordagem CTSA (Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente). A sala de aula de Química, portanto, deve consolidar-se como um espaço político-pedagógico de agência social, capaz de converter conceitos moleculares abstratos em ferramentas de leitura crítica da realidade.

Conclui-se que o avanço sustentável e a resiliência da civilização humana perante o Antropoceno dependem umbilicalmente de um Ensino de Química comprometido com a ética ambiental, com a desconstrução da inércia social e com a formação de cidadãos emancipados, aptos a tutelarem o futuro da vida na Terra.

REFERÊNCIAS

1. ANASTAS, Paul T.; WARNER, John C. **Green chemistry: theory and practice**. Oxford: Oxford University Press, 1998.
2. BAUMAN, Zygmunt. **Modernidade líquida**. Tradução de Plínio Dentzien. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2001.
3. DE MORAES CASTRO, Laurenia; SOBRAL DA SILVA MAIA, Jorge. **Educação ambiental crítica e formação de educadores: Uma abordagem integrada para a sustentabilidade**. Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), [S. l.], v. 19, n. 7, p. 500–508, 2024.
4. FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. **Relatório anual de desmatamento da Mata Atlântica**. São Paulo, 2024. Disponível em: sosma.org.br. Acesso em: 16 abr. 2026.
5. HOBBS, Eric J. **A Era das Revoluções 1789-1848**. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2014, p. 59.
6. INSTITUTO TRATA BRASIL. **Ranking do Saneamento 2024**. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br>. Acesso em: 16 abr. 2026.
7. MADDOX, Brenda. **Rosalind Franklin: a dama negra do DNA**. Tradução de Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: José Olympio, 2005.

8. MONÇÃO, N. B. N.; ALENCAR, H. A. C.; FERREIRA, L. N. A. O ensino de Química Verde: uma revisão sistemática da produção científica nacional e internacional. **Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**, Florianópolis, v. 19, n. 1, 2026. Disponível em: ufsc.br. Acesso em: 16 abr. 2026.
9. RODRIGUES, F. L. O impacto da Química Verde na Agenda 2030: uma análise temática sob a perspectiva CTS. **Periódicos Brasil**, [s. l.], 2026. Disponível em: [link do site]. Acesso em: 16 abr. 2026.
9. VEIGA, José Eli da. **Economia socioambiental**. São Paulo: Senac, 2010.
10. VON WEIZSÄCKER, Ernst Ulrich; WIJCKMAN, Anders. **Come on!: capitalism, short-termism, population and the destruction of the planet**. New York: Springer, 2018.
11. VILLELA, Annibal Villanova; SUZIGAN, Wilson. **Política do governo e crescimento da economia brasileira: 1889-1945**. Rio de Janeiro: IPEA/INPES, 1973.
12. WARNER, John C.; ANASTAS, Paul T. **Green chemistry: theory and practice**. Oxford: Oxford University Press, 1998.
13. WOOD, Ellen Meiksins. **A origem do capitalismo**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2001.
14. ZIMMERMAN, Julie B.; ANASTAS, Paul T. **The periodic table of the elements of green and sustainable chemistry**. *Green Chemistry*, v. 21, n. 24, p. 6545–6566, 2019.
15. ZUIN, Vânia Gomes. **Química verde e sustentabilidade no ensino de química**. São Carlos: UFSCar, diversos trabalhos acadêmicos.

