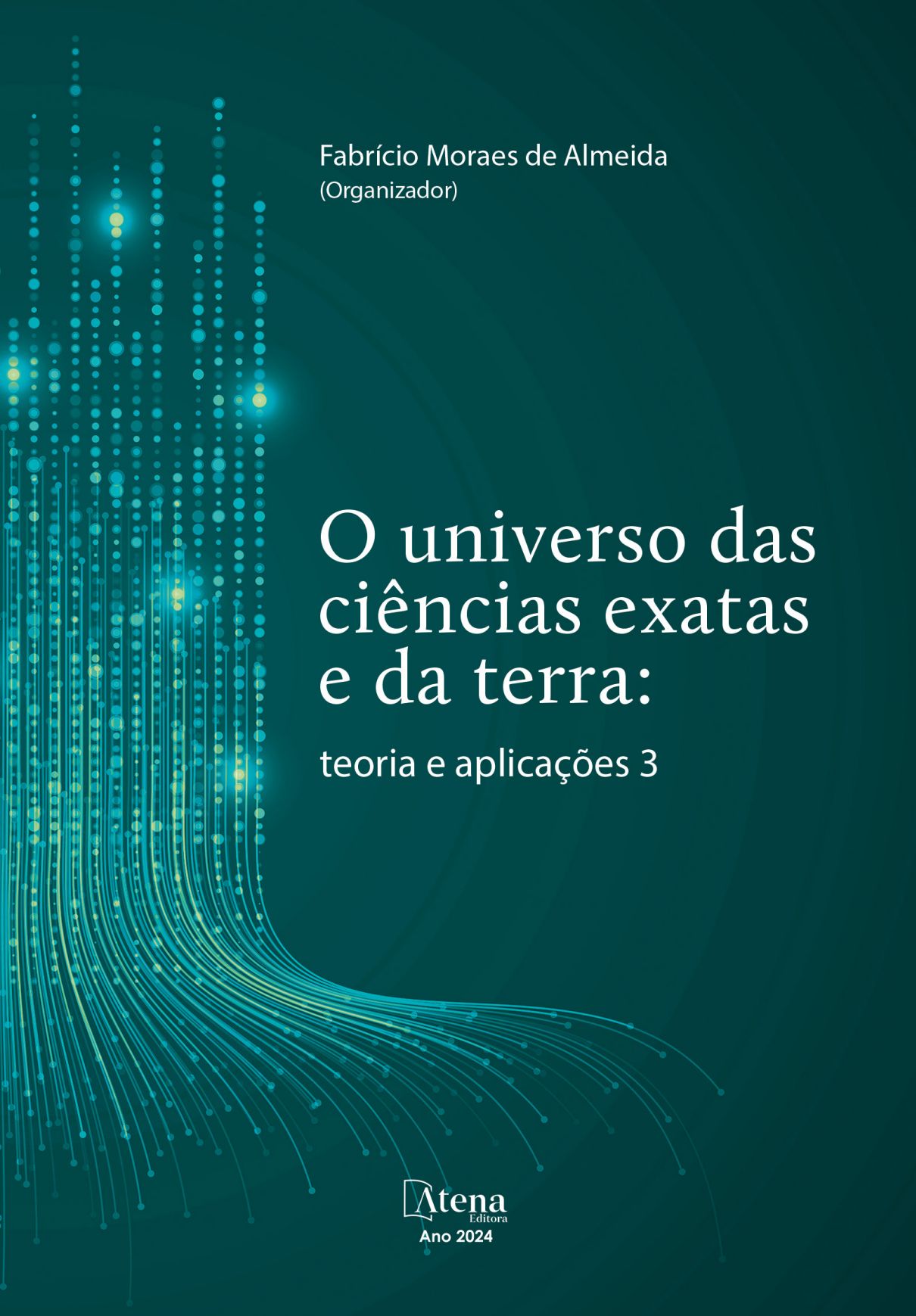
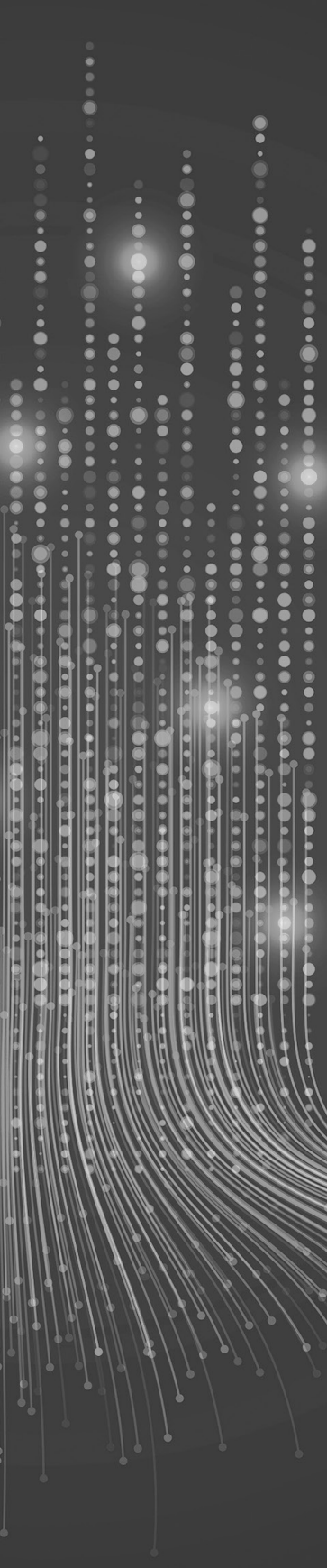




Fabício Moraes de Almeida
(Organizador)

O universo das ciências exatas e da terra:

teoria e aplicações 3



Fabrício Moraes de Almeida
(Organizador)

O universo das ciências exatas e da terra:

teoria e aplicações 3

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Ellen Andressa Kubisty

Luiza Alves Batista

Nataly Evilin Gayde

Thamires Camili Gayde

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2024 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2024 O autor

Copyright da edição © 2024 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelo autor.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo da obra e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva do autor, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos ao autor, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Os manuscritos nacionais foram previamente submetidos à avaliação cega por pares, realizada pelos membros do Conselho Editorial desta editora, enquanto os manuscritos internacionais foram avaliados por pares externos. Ambos foram aprovados para publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
 Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Colégio Militar Dr. José Aluisio da Silva Luz / Colégio Santa Cruz de Araguaina/TO
 Profª Drª Cristina Aledi Felsemburgh – Universidade Federal do Oeste do Pará
 Prof. Dr. Diogo Peixoto Cordova – Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul
 Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
 Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
 Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
 Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
 Prof. Dr. Fabrício Moraes de Almeida – Universidade Federal de Rondônia
 Profª Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá
 Prof. Dr. Hauster Maximiler Campos de Paula – Universidade Federal de Viçosa
 Profª Drª Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco
 Profª Drª Jéssica Barbosa da Silva do Nascimento – Universidade Estadual de Santa Cruz
 Profª Drª Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
 Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
 Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
 Prof. Dr. Leonardo França da Silva – Universidade Federal de Viçosa
 Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
 Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
 Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
 Prof. Dr. Marcos Vinicius Winckler Caldeira – Universidade Federal do Espírito Santo
 Profª Drª Maria Iaponeide Fernandes Macêdo – Universidade do Estado do Rio de Janeiro
 Profª Drª Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas
 Profª Drª Mariana Natale Fiorelli Fabiche – Universidade Estadual de Maringá
 Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
 Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes
 Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
 Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
 Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense
 Profª Drª Priscila Natasha Kinas – Universidade do Estado de Santa Catarina
 Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
 Prof. Dr. Rafael Pacheco dos Santos – Universidade do Estado de Santa Catarina
 Prof. Dr. Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá
 Profª Drª Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro
 Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
 Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

O universo das ciências exatas e da terra: teoria e aplicações 3

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Maiara Ferreira
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizador: Fabrício Moraes de Almeida

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)	
U58	O universo das ciências exatas e da terra: teoria e aplicações 3 / Organizador Fabrício Moraes de Almeida. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2024. Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-258-3003-2 DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.032242712 1. Ciências exatas. 2. Ciências da terra. I. Almeida, Fabrício Moraes de (Organizador). II. Título. CDD 509
Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DO AUTOR

Para fins desta declaração, o termo 'autor' será utilizado de forma neutra, sem distinção de gênero ou número, salvo indicação em contrário. Da mesma forma, o termo 'obra' refere-se a qualquer versão ou formato da criação literária, incluindo, mas não se limitando a artigos, e-books, conteúdos on-line, acesso aberto, impressos e/ou comercializados, independentemente do número de títulos ou volumes. O autor desta obra: 1. Atesta não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação à obra publicada; 2. Declara que participou ativamente da elaboração da obra, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final da obra para submissão; 3. Certifica que a obra publicada está completamente isenta de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirma a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhece ter informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autoriza a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação da obra publicada, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. A editora pode disponibilizar a obra em seu site ou aplicativo, e o autor também pode fazê-lo por seus próprios meios. Este direito se aplica apenas nos casos em que a obra não estiver sendo comercializada por meio de livrarias, distribuidores ou plataformas parceiras. Quando a obra for comercializada, o repasse dos direitos autorais ao autor será de 30% do valor da capa de cada exemplar vendido; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Em conformidade com a Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD), a editora não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como quaisquer outros dados dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

Scientiae exactae et terrae sunt cuneos fundamentales cognitionis, isto é, são necessários e suficientes para resolver os mistérios do Universo, do desenvolvimento para maximização da ciência, da transformação tecnológica e da inovação. Em geral, a teoria e a prática das ciências exatas e da terra, potencializam as diversas soluções para os desafios da sociedade do século XXI.

Em princípio, no livro, as demonstrações teórico-práticos convergem para os resultados ótimos, apresentados pelos vários autores na elaboração de cada capítulo. Em regra, a Atena Editora oferece a divulgação técnico-científica com qualidade, primordial para garantir o destaque entre as melhores editoras da América Latina.

Fabício Moraes de Almeida
Ciências Exatas e da Terra

CAPÍTULO 1 1**MODELAGEM QUANTITATIVA, DESENVOLVIMENTO REGIONAL E AS HIDRELÉTRICAS DO RIO MADEIRA - RO**

Elmir Marques Gonçalves Filho

David Lopes Maciel

Aírton Ribeiro dos Santos

Paulo Roberto Meloni Monteiro

Fabrício Moraes de Almeida

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0322427121>**CAPÍTULO 235****GEOFÍSICA APLICADA À SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO: APLICAÇÃO DA TOMOGRAFIA ELÉTRICA DE RESISTIVIDADE A UM ESTUDO DE CASO NA BAIXADA CUIABANA NO ESTADO DE MATO GROSSO**

Marcio Correia de Amorim

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0322427122>**CAPÍTULO 364****DIAGNÓSTICO VISUAL DE EROSÃO NA ÁREA DO CÂMPUS UNIVERSITÁRIO DA UFMT EM VÁRZEA GRANDE - MT**

Diandra Deyse Rodrigues Arraes

Gabriel Lauretti de Oliveira

Fabiani Maria Dalla Rosa Barbosa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0322427123>**CAPÍTULO 4 81****CONSTITUYENTES QUÍMICOS DE LA CASSAVA, SU CONTENIDO DE CIANURO Y DETOXIFICACIÓN DE ESTE**

A.L. Paredes-Doig

E. Doig-Camino

A. La Rosa-Toro

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0322427124>**CAPÍTULO 594****SENSORES FOTOELETROQUÍMICOS BASEADOS EM TIO₂ PARA DETERMINAÇÃO DE DOPAMINA**

José Thiago do Nascimento Pereira

Kerene Cristina Bedi

Claudimira Elisa Nginga Fula

Raiane Guilherme da Silva

Francisco Adjedam Gomes Oliveira

Bruno Peixoto de Oliveira

Francisco Wirley Paulino Ribeiro

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0322427125>

CAPÍTULO 6 120**URUCUM NA INDÚSTRIA COSMÉTICA: POTENCIAIS TERAPÊUTICOS E ESTÉTICOS PARA CUIDADOS COM A PELE**

Diego Rockenbach Dias

Tainã de Oliveira Ferreira

Niumaique Gonçalves da Silva

Maria Antonia Pedrine Colabone Celligoi

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0322427126>**CAPÍTULO 7 133****NANOEMULSIONES: UN ENFOQUE HACIA EL USO DE EMULSIFICANTES DE ORIGEN NATURAL**

M.E. Guatemala-Cisneros

M.O. Hernández-Jiménez

J.D.A. Loa

N.G. Rojas-Avelizapa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0322427127>**CAPÍTULO 8 147****IDENTIFICAÇÃO VEICULAR E EXAME QUÍMICO-METALOGRAFICO EM MOTOCICLETA**

Leonardo de Paula Miranda

Thatiane Lopes Oliveira

Leila Conceição de Paula Miranda

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0322427128>**CAPÍTULO 9 157****GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS QUÍMICOS GERADOS EM LABORATÓRIOS DE ENSINO E PESQUISA DE UM CENTRO UNIVERSITÁRIO DO NORTE DO PARANÁ (BRASIL)**

Angélica de Almeida Moura

Raiani Randoli

Vagner Marques de Moura

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0322427129>**CAPÍTULO 10..... 173****NÚMEROS COMPLEXOS NAS CIÊNCIAS EXATAS E NA ENGENHARIA ELÉTRICA**

Thiago Daboit Roberto

Isabelle Ferreira Pesset

Edísio Alves de Aguiar Junior

Maximiano Correia Martins

Thiago Corrêa Almeida

André Pereira de Almeida

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.03224271210>

CAPÍTULO 11 187**REVISÃO SOBRE MÉTODOS NUMÉRICOS PARA SOLUÇÕES APROXIMADAS DE EQUAÇÕES DE MECÂNICA DOS FLUIDOS**

Clézio Abilio dos Santos

Kamira Miksza Fragoso

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.03224271211>**CAPÍTULO 12.....209****MAPLE NO ENSINO DE MATEMÁTICA: MÉTODOS PARA CRIAÇÃO DE EXERCÍCIOS E RECURSOS VISUAIS**

Thiago Daboit Roberto

Maximiano Correia Martins

André Pereira de Almeida

Thiago Corrêa Almeida

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.03224271212>**CAPÍTULO 13..... 217****REALIDADE AUMENTADA NO ENSINO DE FÍSICA**

Thiago Daboit Roberto

André Pereira de Almeida

Thiago Corrêa Almeida

Maximiano Correia Martins

Flávia Luzia Jasmim

Levi Phelipe da Silva Franklin

Miguel Lucas Vasconcellos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.03224271213>**SOBRE O ORGANIZADOR 231****ÍNDICE REMISSIVO232**

MODELAGEM QUANTITATIVA, DESENVOLVIMENTO REGIONAL E AS HIDRELÉTRICAS DO RIO MADEIRA - RO

Data de submissão: 01/12/2024

Data de aceite: 02/12/2024

Elmir Marques Gonçalves Filho

Mestrado em Desenvolvimento Regional e Políticas Públicas na Universidade Federal de Rondônia - UFRO. Pós-graduado em Gestão Empresarial – MBA/FGV.

David Lopes Maciel

Master of Science in Emergent Technologies in Education. MUST UNIVERSITY, MUST, EUA, Academic of the Doctoral Program in Regional Development and Environment (PGDRA/UFRO).

Aírtion Ribeiro dos Santos

Pós-graduação em docência do ensino superior. Mestrando PGDRA/UFRO.

Paulo Roberto Meloni Monteiro

Doutorando PGDRA/Universidade Federal de Rondônia, Brasil.

Fabício Moraes de Almeida

PhD in Physics (UFC), with post-doctorate in Scientific Regional Development (DCR/CNPq). Specialist in Production Engineering (FUNIP). Researcher of the Doctoral and Master Program in Regional Development and Environment (PGDRA/UFRO). Leader GEITEC – Federal University of Rondônia, Brazil.

RESUMO: Neste capítulo do livro, analisamos os cenários e as transformações econômicas em Porto Velho - RO, focando nos setores público e privado e relacionando com os empreendimentos hidrelétricos do Rio Madeira. O objetivo foi identificar a situação socioeconômica do município, investigando o impacto dos investimentos nas usinas hidrelétricas e outros investimentos, e sua relação com o desenvolvimento regional, incluindo a análise do orçamento municipal e do PIB. Utilizamos uma metodologia de pesquisa exploratória e quantitativa, trabalhando com dados primários e secundários e empregando estatísticas descritivas, além de pesquisa documental e bibliográfica. Descobrimos que as obras das usinas atraíram novos investimentos, empresas e profissionais, criando um ambiente propício ao desenvolvimento devido ao grande volume de recursos financeiros federais. No entanto, apesar do aumento do PIB e da receita municipal, a pesquisa não comprovou um desenvolvimento socioeconômico significativo em Porto Velho. As políticas públicas funcionaram como uma força dispersora para o setor e capital privado, não promovendo o desenvolvimento esperado.

PALAVRAS-CHAVE: Métodos Quantitativos. Empreendimentos hidrelétricos. Desenvolvimento regional. Desenvolvimento Econômico.

ABSTRACT: This study analyzes the economic transformations in Porto Velho - RO, focusing on the public and private sectors and their relationship with the Madeira River hydroelectric projects. The objective was to identify the current socioeconomic situation of the municipality, investigating the impact of investments in hydroelectric plants and other investments, and their relation to regional development, including an analysis of the municipal budget and GDP. The methodology employed exploratory and quantitative research, using primary and secondary data and descriptive statistics, along with documental and bibliographic research. The findings reveal that the hydroelectric projects attracted new investments, businesses, and professionals, creating a favorable environment for development due to the significant federal financial resources invested during this period. However, despite the increase in GDP and municipal revenue, the research did not confirm substantial socioeconomic development in Porto Velho. Public policies acted as a dispersing force for the private sector and capital, failing to promote the expected development.

KEYWORDS: Quantitative Methods. Economic transformations. Hydroelectric projects. Regional development. Public policies.

1 | INTRODUÇÃO

A visível metamorfose do espaço e da geografia econômica de Porto Velho – RO, exige uma explicitação de categorias analíticas, referenciando a teoria do desenvolvimento econômico para estudar a mobilidade de capital, trabalho, pessoas e ideias. Isso possibilita verificar as dinâmicas territoriais, destacando a área urbana e os setores públicos e privados, relacionando essas transformações com os empreendimentos hidrelétricos do Rio Madeira. A escassez de informações e a crescente demanda por desenvolvimento econômico e social, combinados com desafios de gestão ambiental, incentivam pesquisas sobre a distribuição espacial da produção e fatores locais determinantes.

Observa-se um campo fértil onde pesquisadores analisam reflexos de possíveis mudanças de paradigma em organização industrial, comércio local, saúde pública, mobilidade social, planejamento urbano, políticas públicas, produção e distribuição de bens e serviços. Esses fatores dialogam com a questão de uma nova coalizão de forças sociopolíticas ou a redefinição das existentes, buscando entender as dinâmicas econômicas e sociais de Porto Velho.

O objetivo é identificar a situação socioeconômica de Porto Velho a partir dos investimentos públicos nas usinas hidrelétricas do Rio Madeira, analisando o orçamento municipal e o PIB. A modelagem quantitativa inclui análise das receitas e despesas municipais de 2007 a 2012, transformações econômicas, evolução do emprego, frota de veículos, registro de empresas, e desenvolvimento baseado no Índice FIRJAN. Ademais, analisa a teoria das aglomerações e teorias de Douglass North, Krugman, Fukuyama e Mueller.

Os objetivos específicos são: analisar a dinâmica do capital em Porto Velho, identificar a sustentabilidade dos novos empreendimentos após a cessação dos investimentos públicos e privados, e compreender os problemas econômicos, sociais e ambientais decorrentes dos empreendimentos hidrelétricos. As questões estruturais que implicam o desenvolvimento socioeconômico territorial são fundamentais para entender se há uma nova coalizão de forças sociopolíticas ou uma redefinição das existentes. Por fim, deve-se considerar que um pesquisador isolado não pode abranger todas as facetas dessas problemáticas, sendo necessário analisar movimentos sincrônicos e diacrônicos da economia local (SANTOS, 2012).

Já em 2023, por exemplo, de acordo com RONDÔNIA (2023), RO se tornou destaque em diferentes rankings que medem o desenvolvimento dos estados brasileiros, reflexo das tentativas de ações do Governo e as propostas executadas pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico (Sedec). O Estado se consolidou como referência na região Norte, foi o 3º mais competitivo da Amazônia, com destaque na produção agropecuária, sendo o maior produtor de leite (IBGE, 2023) e o 1º em exportação de carne bovina (Comex Stat, 2022), além de possuir o maior rebanho bovino livre de aftosa sem vacinação do país segundo a Agência de Defesa Sanitária Agrosilvopastoril do Estado de Rondônia (Idaron). Também é o principal produtor de peixes nativos do país, com destaque para o Tambaqui de acordo com Peixe BR (2023).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Rondônia se destaca na região Norte como o 1º lugar em produção de Café Canephora; o 2º em produção de milho; o 2º em produção de arroz e o 3º em exportação de soja na região (Comex Stat, 2022). Além disso, é líder na extração de estanho no Brasil, ocupando o 1º lugar (ANM, 2022), e é o 2º maior exportador desse minério no país (Comex Stat, 2022). Rondônia também se destaca como o 2º em extração de nióbio (ANM, 2022) na Região Norte, consolidando sua posição como um importante polo econômico e produtivo.

2 | METODOLOGIA E A PESQUISA APLICADA

De acordo com Köche (2005) conhecimento científico é visto como dotado de alto poder de crítica, que em função da utilização da linguagem precisa, delimitada, define a precisão dos conceitos e estabelece a classe dos correspondentes empíricos, que permitem a realização dos experimentos para colher evidências verificadoras de suas validades, e pela possibilidade de discutir seus resultados de forma intersubjetiva na comunidade científica. Dessa forma, esses experimentos são feitos seguindo procedimentos, métodos, de acordo com os critérios comuns mínimos de verificabilidade reconhecidos e aceitos pela comunidade científica. E Andrade (2004), afirma que:

Há algum tempo, considerava-se a pesquisa científica “coisa de gênio”, ou seja, algo excepcional, fruto da “inspiração”, avesso a qualquer tipo de planejamento. Hoje, já

não é mais possível admitir essa ideia de “estalo”, pois sabe-se que as descobertas e as invenções do mundo moderno não ocorrem por acaso ou por “intuição”, mas por meio de pesquisas sistemáticas, organizadas.

E para Silva (2005), nos canais formais o processo de comunicação é lento, mas necessário para a memória e a difusão de informações para o público em geral. Os canais formais são oficiais, públicos e controlados por uma organização. Destinam-se a transferir informações a uma comunidade, não há um indivíduo, e torna público o conhecimento produzido. Os canais formais são permanentes, as informações que veiculam são registradas em um suporte e assim se tornam mais acessíveis. E os canais informais, por meio do contato face a face ou mediados por um computador, são fundamentais aos pesquisadores pelas oportunidades proporcionadas para as trocas de ideias, discussões e *feedbacks* com os pares.

Neste trabalho, a metodologia científica tem foco na pesquisa exploratória e na pesquisa quantitativa, trabalhando com dados primários e secundários, fazendo uso da estatística descritiva. Além disso, utiliza a pesquisa documental e a pesquisa bibliográfica, com foco na teoria de North (1971) e outros, dentro do processo de desenvolvimento regional, a geografia econômica com base nos fundamentos de Krugman (1991) e a teoria de Fukuyama (2005) sobre a construção do estado, fazendo a relação com as transformações econômicas ocorridas em Porto Velho com o advento dos empreendimentos hidrelétricos. Complementando a partir de informações obtidas em pesquisa documental sobre os dados socioeconômicos do município de Porto Velho. A questão inicial é saber, a partir da análise e aplicação da modelagem, analisando a situação socioeconômica do município no período compreendido entre os anos de 2007 a 2012, às ocorrências neste cenário dos empreendimentos hidrelétricos do Rio Madeira, as transformações econômicas e o desenvolvimento regional. Para modelagem utiliza-se a **MODELAGEM QUANTITATIVA**.

E, além disso, de acordo com Severino (2012), a pesquisa exploratória, “busca apenas levantar informações sobre um determinado objeto, delimitando assim um campo de trabalho, mapeando as condições de manifestação desse objeto. Na verdade, ela é uma preparação para a pesquisa explicativa”. E para Silva (2005), do ponto de vista da forma de abordagem do problema pode ser pesquisa quantitativa: considera que tudo pode ser quantificável, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las. Portanto, proporcionar informações sobre o assunto que está sendo investigado, orientando o enfoque para o assunto com mineração de banco de dado, conforme a seguir, no Quadro 1.

Metodologia	Instrumento	Fonte
Pesquisa Exploratória/documental		- PPA (2006 até 2009); - Plano Diretor (2008); - CNI (2012); - FIERO (2010); - SINDFLUVIAL (2012);
Pesquisa Quantitativa e Modelagem	- Índice FIRJAN de desenvolvimento municipal para Porto Velho.	- Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (2010);
	- Percentuais	- PIB de Porto Velho (2007 até 2012); - Orçamento do município de Porto Velho (2007 até 2012); - JUCER (2013); - LDO (2013); - ABRASCE (2009); - IBGE (2014); - SEDES (2012).
Pesquisa Bibliográfica		- North (1971) <i>et alii</i>; - Krugman (1991); - Fukuyama (2005).

Quadro 1 – Metodologia/Instrumento/Banco de dados.

Fonte: Autor, 2024.

E de acordo com Severino (2012), a pesquisa bibliográfica é: aquela que se realiza a partir do registro disponível, decorrente de pesquisas anteriores, em documentos impressos, como livros, artigos, teses etc. Utiliza-se de dados ou de categorias teóricas já trabalhados por outras pesquisas e devidamente registrados. Os textos tornam-se fontes dos temas a serem pesquisados. O pesquisador trabalha a partir das contribuições dos autores dos estudos analíticos constantes dos textos.

Dessa forma, o Quadro 1, demonstra as fontes bibliografias utilizadas na pesquisa. E a pesquisa bibliográfica como técnica tem por objetivo a descrição e a classificação dos livros, e-books, dissertações, teses, artigos científicos de revistas indexadas e outros, para a reflexão teórica sobre os temas estudados.

E por fim, “sendo o conhecimento construção do objeto que se conhece, atividade de pesquisa torna-se elemento fundamental e imprescindível no processo de ensino/aprendizagem” (Severino, 2012).

3 | DESENVOLVIMENTO REGIONAL E MODELAGEM ECONÔMICA

3.1 Crescimento, Desenvolvimento e Meio Ambiente.

As correntes do pensamento econômico que tratam o assunto relacionado ao crescimento, desenvolvimento e meio ambiente têm em Mueller (2012) o fundamento teórico que abrange as questões que estão na origem da economia do meio ambiente. Essencialmente elas estão interligadas com os impactos sobre o meio ambiente de

crescimento contínuo da escala da economia mundial.

De acordo com Mueller (2012), a população humana e a produção mundial vêm se expandindo, levando, de um lado, a um aumento continuado da extração de recursos naturais do meio ambiente, e produzindo, de outro lado, volumes cada vez maiores de emissões de resíduos e rejeitos para o meio ambiente, muitos destes de elevado potencial nocivo. A questão que se coloca é: será que não existem limites para essa expansão? Será que a economia mundial pode continuar a se expandir indefinidamente sem provocar sérias repercussões ambientais?

Em conjunto às estimativas sobre essas questões está o desafio de moldar estruturas institucionais e aparatos de políticas que possam reduzir os impactos ambientais mais nocivos, decorrentes da expansão das atividades humanas. Para enfrentar com sucesso esse desafio, é desejável que se forme consenso a respeito dos problemas ambientais que mais preocupam, bem como sobre a natureza dos instrumentos a serem usados para resolvê-los ou amenizá-los. Contudo, esse consenso está muito distante de ser alcançado.

Observa-se que existem formas diferentes de perceber essas questões, sugestões distintas de estratégias e políticas para enfrentá-las. Essas diferenças não se restringem à análise econômica, mas elas têm impactos importantes sobre a evolução de corrente de pensamento da economia do meio ambiente.

Fazendo analogia biológica, considera-se que a sociedade humana é um organismo vivo, complexo e multifacetado que, como todo ser vivo, retira energia e matéria de alta qualidade de seu meio externo, o meio ambiente, usando para se manter, crescer, evoluir, e devolve-as a esse meio externo degradado, na forma de energia dissipada, resíduos e dejetos, ou seja, de poluição. Mueller (2012) estabelece que desde o momento em que, nos primórdios dos tempos, o homem se organizou em sociedade, esse fluxo de matéria e energia está na base do funcionamento da economia humana, semelhantemente, aliás, ao que acontece com todo ser vivo.

De acordo com Mueller (2012), a atual preocupação com os impactos ambientais causados pela sociedade humana resulta, pois, da escala elevada da economia mundial dos nossos dias. Enquanto essa era reduzida, os impactos globais da atividade econômica eram pequenos e localizados; com sua ampliação, esses impactos aumentaram significativamente. Em termos muito gerais, na dimensão da economia global dois componentes básicos: a magnitude da população humana; e o nível de renda per capita médio, que representa o nível da produção material por habitante. E esses dois componentes têm fortes relações com a questão ambiental.

Com efeito, por mais pobre que seja uma sociedade, se a sua população cresce a taxa elevada, aumenta o número de pessoas que requerem alimentos e o mínimo de bens e serviços; aumentam o requerimento de espaço para abrigar e alimentar essas pessoas; e ampliam-se as emissões de resíduos, de rejeitos. Aumenta, pois, sua escala.

A degradação ambiental de países pobres superpovoados e de elevado dinamismo demográfico é qualitativamente diferente da que ocorre nos países ricos, mas ela existe e é preocupante. Inclui, por exemplo, o lixo que se acumula próximo a residências e os dejetos humanos não recolhidos e tratados; a poeira nos aglomerados urbanos; a fumaça da queima de lenha e esterco dentro das residências; a destruição dos solos e das florestas associadas à ocupação de terras, à erosão e à degradação das águas causadas por populações de regiões de elevada densidade demográfica e de taxas elevadas de crescimento populacional.

Considerando a abordagem sistêmica das relações entre a economia e o meio ambiente, ainda Mueller (2012) propõe a suposição de não economista, dotado de inteligência e certa dose de bom senso, imaginando também, que essa pessoa tenha ideia de como a ciência se organiza na análise de temas. Se essa pessoa fosse solicitada a examinar o funcionamento, em grandes linhas, do sistema econômico, certamente concluiria que opera, inserido no meio ambiente, com o qual interage, dele retirando recursos naturais essenciais para serem transformados em bens e serviços, tendo em vista, em última instância, o consumo.

Demonstrando, também, que tanto a produção como o consumo geram resíduos, rejeitos, poluentes que, em boa parte, acabam sendo devolvidos ao meio ambiente. E um pouco mais de raciocínio levaria essa pessoa a concordar que a extração de recursos naturais, notadamente os não renováveis, não só altera a disponibilidade destes na natureza, como tem impactos sobre o estado geral do meio ambiente. Na verdade, com base na sua experiência pessoal, concluiria que as condições do meio ambiente podem ser fortemente afetadas pela disposição de resíduos, pela emissão e pela concentração de poluentes originados do funcionamento da economia.

As correntes de pensamento da economia do meio ambiente consideram o sistema econômico, como aquele que interage explicitamente com o meio ambiente. Para todas estas, fornece recursos naturais essenciais à produção e recebe os fluxos de resíduos, rejeitos e poluição do sistema econômico.

Mas as principais abordagens não tratam da mesma forma essa relação, isto é, dependendo do horizonte temporal que considere, e do seu viés analítico, elas vão desde abordagens focalizando principalmente o que acontece dentro do sistema econômico em decorrência das relações entre a economia e o meio ambiente, que são consideradas de forma superficial, até análises privilegiando fortemente tais relações.

3.2 A Teoria Institucionalista de North (North, 1971).

A Teoria Institucionalista de Douglass North é uma nova postura na história da economia, oferecendo bases para desenvolver e criar teorias em que se integre o assunto das instituições e o abstrato da teoria econômica, no desenvolvimento desta teoria North (1971) estabelece que:

As instituições são as restrições que humanamente são concebidas pela estrutura política, econômica e de interação social. Elas consistem de constrangimentos informais (sanções, tabus, costumes, tradições, e os códigos de conduta), e regras formais (constituições, leis, direitos de propriedade). Ao longo da história, as instituições foram criadas por seres humanos para criar ordem e em troca reduzir a incerteza. Em conjunto com a norma oferece as limitações da economia que definem o conjunto de escolha e, portanto, determinar sobre a transação e os custos de produção e, consequentemente, a rentabilidade e a viabilidade de se dedicarem à atividade econômica. Elas evoluem incrementalmente, conectando o passado com o presente e o futuro; sua história em consequência é, em grande parte, uma história de evolução institucional no qual o desempenho histórico da economia só pode ser entendido como parte de uma história sequencial. (North, 1971).

Ainda de acordo com North (1971) as instituições têm a responsabilidade de oferecer a estrutura de incentivos da economia; com a evolução dessa estrutura, ocorre o sentido da mudança econômica no sentido do crescimento, permitindo a estagnação ou declínio da estrutura econômica. As instituições são detentoras de recursos para definir e fazer cumprir acordos de intercâmbio.

No desenvolvimento da Teoria Institucionalista, North (1971) faz uma abordagem sobre os custos de transação, considerando um fator determinante ao desempenho econômico, no qual as instituições e a eficácia da execução (em conjunto com a tecnologia empregada) podem determinar o custo de transação. Assim, quando as instituições são eficazes aumentam os benefícios de soluções cooperativas e reduz os custos da deserção. No custo da transação, as instituições reduzem os custos de produção por troca, para que os ganhos potenciais do comércio possam ser realizáveis. Ambas as instituições políticas e econômicas são partes essenciais de uma matriz institucional eficaz.

No contexto da pesquisa e objetos de trabalhos na Teoria Institucionalista North (1971), estabeleceu o seguinte:

O principal foco da literatura sobre as instituições e os custos de transação tem sido sobre as instituições como sendo as soluções eficientes para os problemas de organização de um quadro competitivo (Williamson, 1975; 1985 apud North 1091). Assim troca de mercado, a franquia, ou integração vertical são concebidas na literatura como soluções eficientes para os problemas complexos com que se deparam os empresários sob diferentes condições de concorrência. (North, 1971).

Dessa forma, estabelece North (1971) que as limitações econômicas formais ou direitos de propriedade intelectual são especificadas e aplicadas pelas instituições políticas, e a literatura toma simplesmente aqueles como um dado adquirido. Mas a história econômica é esmagadoramente uma história das economias que não conseguiu produzir um conjunto de regras econômicas do jogo (de execução) que induzem crescimento econômico sustentado. A questão central da história econômica e de desenvolvimento econômico é a conta para a evolução das instituições políticas e econômicas que criam um ambiente econômico que induz o aumento da produtividade.

Nas considerações de North (1971), a transformação de incerteza em risco foi uma novidade evolutiva. De acordo com North (1971), incerteza refere-se a uma condição na qual não é possível determinar a probabilidade de um evento e, por isso, não é possível chegar a uma forma de seguro contra tal ocorrência. Quanto ao risco, implica uma capacidade de fazer o cálculo factual para determinação da probabilidade de um evento e, por conseguinte, assegurar-se contra esse tipo de resultado. No mundo atual, insegurança e diversificação são métodos para converter a incerteza em risco, possibilitando assim a redução dos custos de transação, por meio do fornecimento de uma compensação contra variabilidade.

De acordo com North (1971), neste contexto o estado foi um dos principais atores em todo este processo, e não foi contínua a interação entre o estado e as necessidades fiscais da sua credibilidade em suas relações com os revendedores e a cidadania em geral. O autor considera que em particular, a evolução dos mercados de capitais foi muito influenciada pelas políticas do estado, uma vez que, de acordo com a medida, o estado foi obrigado pelos compromissos que não seria confiscar bens ou usar seu poder coercitivo para aumentar a incerteza da troca, possibilitou a evolução das instituições financeiras e a criação de mercados de capitais mais eficientes.

3.3 Construção e Participação do Estado e as Transformações Econômicas

A construção e a participação do estado com base na teoria de Fukuyama (2005) tem sua afirmação em que o estado é uma antiga instituição humana, com cerca de 10 mil anos, época em que nasceram as primeiras sociedades rurais na Mesopotâmia. Na China, um Estado dotado de uma burocracia altamente treinada existiu por milhares de anos. Na Europa, o Estado moderno, com grandes exércitos, poder de taxação e uma burocracia centralizada que podia exercer autoridade soberana sobre um grande território, é muito mais recente, nascido há quatrocentos ou quinhentos anos com a consolidação das monarquias francesa, espanhola e sueca.

A ascensão desses Estados, com sua capacidade de prover ordem, segurança, leis e direitos de propriedade, tornaram possível a ascensão do mundo econômico moderno. De acordo com Fukuyama (2005), os Estados têm ampla variedade de funções, para o bem e para o mal. O mesmo poder coercitivo que lhes permite proteger os direitos de propriedade e prover segurança pública também lhes permite confiscar propriedades privadas e abusar dos direitos dos seus cidadãos. Atualmente é possível ver que não havia nada de errado no consenso de Washington em si: os setores estatais dos países em desenvolvimento eram, em muitos casos, obstáculos ao crescimento e só poderiam ser corrigidos em longo prazo com a liberalização econômica.

Dessa forma, o problema era que, embora os Estados precisassem ser reduzidos em determinadas áreas, ao mesmo tempo precisavam ser fortalecidos em outras. Os

economistas que promoveram a reforma econômica liberalizante compreendiam isto muito bem, em teoria. Mas, naquele período, a ênfase relativa estava fortemente na redução da atividade estatal, a qual muitas vezes podia ser deliberadamente ou não, entendida como uma tentativa de corte generalizado na capacidade do Estado.

A agenda da construção do Estado, no mínimo tão importante quanto a da redução, nunca recebeu tanta atenção ou ênfase. O resultado foi que, em muitos países, a reforma econômica liberalizante deixou de cumprir sua promessa. De fato, em alguns países, a ausência de uma estrutura institucional adequada os deixou em situação pior depois da liberalização do que se esta não tivesse ocorrido. O problema está na incapacidade conceitual básica de decifrar as diferentes dimensões da estatidade e compreender como tais dimensões se relacionam com o desenvolvimento econômico.

Na análise desenvolvida por Fukuyama (2005) em que verifica o Escopo e Força do Estado, inicia analisando o papel do Estado no desenvolvimento, fazendo o seguinte questionamento: Os Estados Unidos têm um Estado forte ou fraco? Uma resposta clara foi dada por Lipset (1995; apud Fukuyama 2005): as instituições americanas são concebidas deliberadamente para enfraquecer ou limitar o exercício do poder do Estado. Os Estados Unidos nasceram de uma revolução contra a autoridade do Estado e a cultura política antiestatizante resultante foi expressa em restrições sobre o poder estatal como governo constitucional com proteções claras para os direitos individuais, a separação dos poderes, o federalismo e assim por diante.

Lipset salienta que o estado de bem-estar social americano foi estabelecido mais tarde e permanece muito mais limitado que aquele de outras democracias, que seus mercados são muito menos regulamentados e que os Estados Unidos quase deram um fim a seu estado de bem-estar social nos anos 80 e 90.

Por outro lado, de acordo com Fukuyama (2005), há outro sentido no qual o Estado americano é um grande equívoco. Max Weber (1946) definiu o Estado como “uma comunidade humana que reivindica (com sucesso) o monopólio do uso legítimo da força física dentro de determinado território”. Em outras palavras, a essência da estatidade é sanção: a capacidade suprema de enviar alguém, com um uniforme e uma arma, para obrigar as pessoas a respeitar as leis do Estado. Neste sentido, o Estado americano é extraordinariamente forte: ele possui uma plethora de agências nos níveis federal, estadual e municipal para forçar o cumprimento de tudo, de regras de trânsito à lei comercial e brechas fundamentais na Carta de Direitos.

Os americanos, por várias razões complexas, não são um povo respeitador da lei quando comparados com cidadãos de outras democracias desenvolvidas (Lipset, 1990), mas não por falta de um sistema de justiça criminal e civil extenso e, com frequência, altamente punitivo, que conta com substanciais poderes para obrigar ao cumprimento da lei.

Assim, os Estados Unidos têm um sistema de governo limitado que vem restringindo historicamente o escopo da atividade do Estado. Dentro desse escopo, sua capacidade

de criar e fazer cumprir leis e políticas é muito forte. É claro que existe uma grande dose de ceticismo justificado por parte de muitos americanos a respeito da eficiência e da sensibilidade do seu próprio governo.

Portanto faz sentido distinguir entre o escopo das atividades do Estado, que se refere às diferentes funções e metas assumidas pelos governos, e a força do poder do Estado, ou a capacidade dos Estados de planejar e executar políticas e fazer respeitar as leis de forma limpa e transparente, o que atualmente de maneira formal chamado de capacidade institucional ou do Estado. Uma das confusões para o entendimento de estatidade é que a palavra força com frequência é usada indiferentemente para se referir àquilo que é chamado de escopo e também a força ou capacidade.

A distinção entre estas duas dimensões de estatidade nos permite criar uma matriz que ajuda a diferenciar os graus de estatidade em vários países em todo o mundo. Podemos dispor o escopo das atividades do Estado ao longo de uma série contínua que vai do necessário e importante ao meramente desejável e opcional e, em certos casos, contraproducente ou mesmo destrutivo.

É claro que não existe uma hierarquia consensual de funções estatais, particularmente quando se trata de questões com redistribuição e política social. A maioria das pessoas concorda que é preciso haver algum grau de hierarquia: os Estados precisam prover a ordem pública e a defesa de invasões externas antes de prover seguro saúde universal ou ensino superior gratuito. O World Development Report de 1997 do Banco Mundial (Banco Mundial, 1997) fornece uma lista plausível de funções do Estado, dividida em três categorias que vão de “mínima” a “intermediária” e “ativista”. Obviamente esta lista não é totalmente abrangente, mas fornece referências úteis para o escopo de Estado.

Se tomar essas funções e a dispor ao longo de um eixo X, como na figura 2, podemos localizar diferentes países em diferentes pontos, dependendo de seu grau de ambição em relação ao que seu governo procura realizar. É claro que há países que tentam complexas tarefas de governança, como dirigir paraestatais ou alocar créditos de investimento, quando são incapazes de prover bens públicos básicos como lei e ordem ou infraestrutura básica. Na tabela os países foram dispostos ao longo do eixo de acordo com os tipos mais ambiciosos de funções que eles procuram realizar.

De acordo com Fukuyama (2005), não existe uma medida comumente aceita para a força das instituições de Estado. Diferentes agências estatais podem estar localizadas em pontos diferentes ao longo deste eixo. Por exemplo, um país como o Egito conta com um aparato eficaz de segurança interna; contudo, não consegue executar tarefas simples como processar pedidos de visto ou licenciar com eficiência a operação de pequenas empresas. Outros países, como o México e a Argentina, foram relativamente bem-sucedidos na reforma de determinadas instituições estatais, como os bancos centrais, mas nem tanto no controle de políticas fiscais nem no provimento de serviços de saúde pública ou ensino de alta qualidade. Em consequência disso, a capacidade do Estado pode variar grandemente

entre as funções, como mostra a Figura 1.

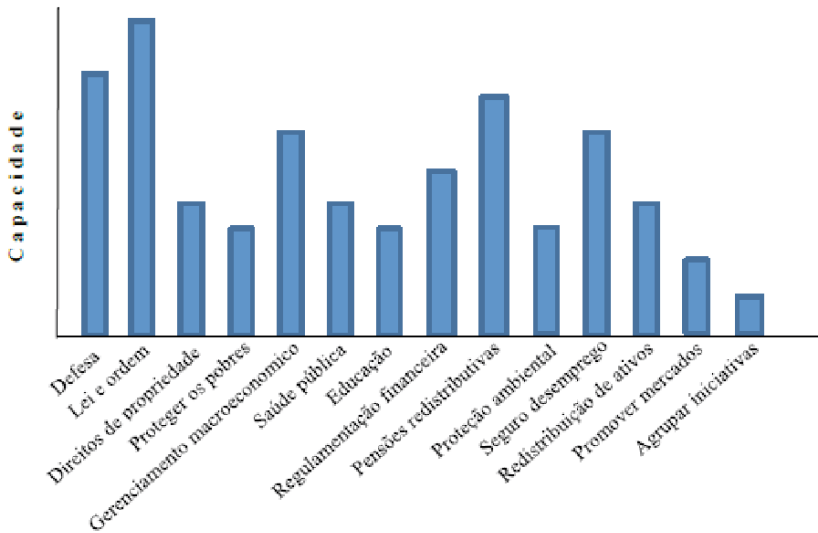


Figura 1– Função do Estado e a Capacidade do estado.

Fonte: Fukuyama, 2005.

A teoria de Fukuyama (2005) avança no sentido de mensurar a eficiência dos Estados, possibilitando aos pesquisadores ferramentas de apoio nas análises, com a ênfase renovada na qualidade institucional nos anos 90, foram desenvolvidos vários índices relevantes que ajudam a localizar os países ao longo do eixo Y. Um deles é o índice de percepção de corrupção, desenvolvido pela Transparency International, o qual se baseia em dados de pesquisa originários principalmente das comunidades de negócios que operam em diferentes países. Outro índice é o dos Números Internacionais de Guia do Risco do País, de produção privada; estes números são divididos em medidas separadas de corrupção, lei e qualidade burocrática.

Além disso, o Banco Mundial desenvolveu indicadores de governança abrangendo 199 países (Kaufmann, Kraay e Mastruzzi, 2003); indicadores para seis aspectos de governança estão disponíveis em www.worldbank.org/wbi/governance/govdata.2002). Também há medidas mais amplas de direitos políticos, como o índice da Freedom House de liberdade política e liberdades civis, que agrega democracia e liberdades civis em um único número guia, e os dados Polity IV sobre características de regime.

3.4 Política de Desenvolvimento e a Modelagem Econômica.

Promover o desenvolvimento não é tarefa simples, além de que não é realizável no curto prazo, é um processo complexo que requer: o amplo conhecimento sobre a realidade presente; iniciativa para pesquisar e realizar; coragem para mudar; realização de um

metodológico planejamento; e principalmente o envolvimento entre o Estado e a sociedade.

Na realidade precisamos compreender basicamente o que é Desenvolvimento, Veiga (2010) determina que existam três tipos de desenvolvimento, a primeira alternativa é considerar a explicação utilizando-se do sinônimo, como sendo, crescimento econômico; a segunda alternativa é o entendimento de que o desenvolvimento não passa de um mito ou manipulação ideológica, ou até mesmo uma ilusão e na terceira alternativa trabalha-se com a recusa as duas sugestões anteriores descartando o sinônimo crescimento econômico e o conceito utópico da ilusão, preferindo trilhar então o chamado “caminho do meio”. Na busca pela explicativa para esta alternativa o autor Veiga (2010) realiza um compêndio dos mais renomados autores e diversos programas sobre desenvolvimento.

Segundo Celso Furtado apud Veiga (2010) a ideia de desenvolvimento econômico é um simples mito. Essa ideia favorece os desvios das atenções básicas de identificação das necessidades fundamentais da coletividade e das possibilidades que abre ao homem o avanço da ciência.

Segundo Veiga (2010) no Relatório do Desenvolvimento Humano de 2004 afirma que “as pessoas são as verdadeiras riquezas das nações”, baseando-se neste princípio, Sen (1998) afirma que; “só há desenvolvimento quando os benefícios do crescimento servem a ampliação das capacidades humanas, entendidas como o conjunto das coisas que as pessoas podem ser, ou fazer na vida”. E avançando nessa pesquisa em busca ao discernimento dos conceitos que envolvem a Política do Desenvolvimento, vamos trazer à pauta de discussão o termo “política econômica”.

Segundo Gremaud, Vasconcellos e Toneto Júnior (2002) definem política econômica como sendo: “a intervenção do governo na economia com o objetivo de manter elevados níveis de emprego e elevadas taxas de crescimento econômico com estabilidade de preços”. Diante do exposto podemos estabelecer um pensamento de que a política econômica é a interferência do Estado na economia de modo a promover ajustes e alavancar o desenvolvimento econômico.

Na conceituação dos teóricos economistas, o desenvolvimento econômico tem que ser a meta mais importante que os planejadores da política econômica devem perseguir. E o alcance do desenvolvimento econômico depende basicamente do aumento da produtividade do trabalho e esta é conseguida por meio de três fatores necessários: acumulação, progresso técnico e o aperfeiçoamento das organizações da atividade econômica. É primordial que estes três fatores estejam interligados entre si e interdependentes.

O plano de desenvolvimento econômico trabalha em dois aspectos, no setor público, determinando as diretrizes para os investimentos das corporações e empresas públicas. No setor privado o plano não trabalha com diretrizes, entretanto, expressa desejos das suas orientações, criando incentivos para estimular os produtores a cumprir o plano, contudo interfere diretamente na formação de preços.

Segundo Heidemann e Salm (2010), Política Pública, em seu conjunto, são decisões e ações de governo e de outros atores sociais. Embora que, outros autores tenham atribuído significados diversos para essa expressão, todas convergem para o sentido da alocação oficial de valores para toda a sociedade, contendo meta, objetivo e propósito.

A Modelagem Econômica é parte de uma ciência social que estuda como a sociedade produz e decide empregar os recursos produtivos escassos, com a finalidade de melhor atender as necessidades da sociedade, ou seja, a Economia. E o objeto de estudo da economia, tem referência central na escassez de recursos, pois toda sociedade tem de escolher as alternativas de produção, de distribuição de resultados da atividade produtiva entre os vários grupos da sociedade. (ARBEX; SALVALAGIO, 2009).

Ao concatenar os conceitos e referências até aqui abordados, resulta na formação do entendimento para a expressão “Política de Desenvolvimento”. A primeira observação a destacar é que as “Políticas Públicas” em sua essência representam instrumentos decisivos e extremamente necessários ao desenvolvimento moderno.

Ao verificar a função da Ciência Econômica e atestar que em sua essência está voltada para produção e distribuição de bens e serviços em favor do bem-estar da sociedade, esclarece que no contexto da Política de Desenvolvimento não se pode excluir o componente econômico, passando a ser uma ferramenta de caráter essencial e indispensável.

A política pública que nasce de ações conjuntas entre o Estado e a sociedade tem em seu escopo o objetivo de atender aos anseios da sociedade, ordenar e desenvolver a execução do planejado é o caminho inicial e também norteador para o Plano de Desenvolvimento, que ao ser trabalhado por estes dois segmentos devem determinar as diretrizes da execução das políticas públicas. Esta é a ferramenta oficial na elaboração, desenvolvimento e execução da Política de Desenvolvimento, a ausência desta ferramenta ou mesmo uma formulação inadequada, tornará inexistente a Política de Desenvolvimento.

O desenvolvimento econômico é específico em suas relações com a produção, tendo o fator capital / trabalho como ponto de partida e o objetivo é a maximização de resultados para este fator. Outro ponto fundamental para o desenvolvimento econômico é o aspecto geográfico, onde o local que são realizadas as operações e o destino dos produtos têm importância vital para todo e qualquer projeto de produção. A infraestrutura oferecida pelo estado, estradas, energia, saneamento. E traz implicações diretas, que podem ser favoráveis ou desfavoráveis ao processo de instalação ou mesmo manutenção das empresas. Neste contexto a Política de Desenvolvimento envolverá e certamente será muito envolvida pela ferramenta desenvolvimento econômico.

De forma conceitual e isolada, o pesquisador busca entender o termo Desenvolvimento e nesta procura, encontra diversos rumos a serem seguidos, a exemplo, trilhar o caminho mostrado por Sen (1998), organizar todos os esforços no sentido de que os benefícios do desenvolvimento venham a ampliar as capacidades humanas. Ao ampliar

estas capacidades certamente a sociedade estará mais próxima de uma melhor qualidade de vida e melhor custo-benefício das relações de capital / trabalho. Este quesito é uma ferramenta essencial no objetivo da Política de Desenvolvimento Regional.

Assim, oferece a metodologia explicativa, expõem os principais “ingredientes” que compõem a formulação da Política de Desenvolvimento no intuito de oferecer ao leitor uma maneira clara e concisa de entender este complexo sistema denominado Desenvolvimento, que ao formar uma expressão com outro termo de grande complexidade que é Política, nos conduz a um emaranhado de conceitos e opiniões, que na maioria das vezes deixa os pesquisadores confusos.

Em resumo a Política de Desenvolvimento compreende um arcabouço de conhecimentos, planos, projetos, orçamentos e designação de responsabilidades, no sentido de que tudo esteja orientado para produzir alterações sustentáveis, em favor do bom andamento do progresso, e visto como uma alternativa de mais emprego e renda, mais educação, mais cultura, melhor saúde pública e boa qualidade de vida com muita felicidade para a população.

3.5 Teoria de Localização e os Empreendimentos Hidrelétricos.

A teoria da localização de Krugman (1991) afirma que o problema definido pela geografia econômica é suficiente para explicar as concentrações de população e/ou das atividades econômicas – a distinção entre faixa industrializada e faixa agrícola, a existência de cidades, o papel dos agrupamentos de empresas. De forma geral todas estas concentrações criam e sobrevivem devido às formas de economias de aglomeração, em que a concentração espacial cria o ambiente econômico favorável que apoia a concentração posterior. E para algumas finalidades deve ser simplesmente suficiente para iniciar a existência de tais economias de aglomeração.

De acordo com Fochezatto (2010), a teoria de Krugman define a configuração espacial, isto é, a concentração industrial como resultado de dois tipos de forças opostas: de aglomeração e de dispersão. Dessa forma, como devem ser os rendimentos da concentração espacial ser modelados?

Além disso, há um século Alfred Marshall (Fochezatto, 2010), sugeriu uma tripla classificação. Em terminologia moderna, argumentou que os distritos industriais apareciam devido à divulgação de conhecimento, às vantagens de mercados centrais para tarefas especializada, e às ligações a montante e a jusante conectadas com os grandes mercados locais. Enquanto todas as três forças de Marshall funcionam no mundo real, os novos modelos geográficos têm negligenciado os primeiros, essencialmente porque restam difíceis para modelar de uma maneira explícita.

No entanto, foram focados no papel das ligações. Isto é, o mecanismo gerador das externalidades, relacionado aos retornos crescentes, está baseado nas forças de interação

do mercado e leva em consideração as backward linkages, transações da empresa com fornecedores, e as forward linkages, transações de empresa com os compradores do seu produto. Dessa forma, o foco de sua abordagem está nos efeitos dos mecanismos de mercado como determinantes da aglomeração e da dispersão espaciais da indústria (Fochezatto, 2010).

Dessa forma, os produtores devem escolher localizações que (i) tenham bons acessos aos grandes mercados e (ii) tenham bons acessos aos fornecedores de bens que eles ou os seus trabalhadores necessitam. Além disso, um lugar que por qualquer razão tem a concentração de produtores tenderá a oferecer um grande mercado e grande oferta de matérias primas e bens de consumo (feitos pelos produtores).

Além disso, existem algumas questões que as discussões tradicionais das ligações e da geografia econômica não levantam. A mais importante destas é a natureza da concorrência. A história das ligações só funciona se existirem rendimentos crescentes na produção ao nível da firma individual – de outro modo a firma não pode concentrar a produção onde o mercado é maior, mas estabelecer uma oportunidade separada para servir cada mercado. Mas se existirem rendimentos crescentes, a concorrência deve ser imperfeita.

Durante quanto tempo fica uma concentração espacial da atividade econômica sustentável? E quando se torna um equilíbrio simétrico, sem concentração espacial, instável? As respostas a ambas as questões dependem do equilíbrio entre forças centrípetas, forças que tendem a promover a concentração espacial das atividades econômicas, e forças centrífugas que se opõem a tal concentração.

Portanto, a proposta da nova geografia econômica, inspirada nos trabalhos de Krugman, contribui à teoria da aglomeração com a introdução dos modelos que envolvem retornos crescentes e competição imperfeita. Além disso, sua origem está nas teorias de localização espacial e aglomeração que procura explicar a distribuição das atividades no espaço geográfico (Fochezatto, 2010).

3.6 Transformações, Economias Industrializadas e a Nova Geografia Econômica.

Em 1990, a nova geografia econômica foi principalmente uma história sobre fabricação e em 1991 de alto rendimento as nações foram responsáveis por 84% do valor da transformação do mundo de adicionado (Krugman, 2010).

Hoje a fração está abaixo de 70 %, com a maior parte do crescimento na produção em países emergentes, principalmente a China. E aqui está a questão: como eu já disse, a nova geografia econômica tem uma espécie de velho oeste, se sentem de modo que as histórias que narra parece mais adequada para a economia norte-americana de 1900 do que de 2010.

Assim, a China é uma potência econômica, mas ainda é muito pobre; permitindo que para os caprichos da paridade do poder de compra, bem como as estimativas de produto interno bruto as comparações entre muito diferentes eras, China hoje parece ter aproximadamente o mesmo nível de produto interno bruto per capita, que os Estados Unidos no início do século XX.

Com destaque a geografia econômica chinesa é muito remanescente da geografia econômica de países de economia avançada desde 1900, e se encaixa perfeitamente no novo quadro da Geografia Econômica. Primeiramente, um dramático padrão núcleo-periferia surgiu, com migrações maciças do centro e oeste da China para a região costeira, e dentro dessa região para o fabrico da Correia do Sul-sudeste (Além de uma migração secundária para Beijing) (BANCO MUNDIAL, 2009 apud Krugman, 2010).

E, em seguida, há a localização industrial histórica. China é o lar de centenas, se não milhares de clusters industriais locais, do isqueiro para a cidade do Rio de Janeiro, que produz 95% da produção mundial, para Yanbu, a roupa interior capital (o vigésimo primeiro século Cohoes). Caso os estudos revelam o clássico forças da localização no local de trabalho; por exemplo, o cluster do motociclo Pengjiang ciclo consiste de três fábricas e cerca de trinta fábricas que produzem os acessórios, e é que os locais de fornecimento de insumos especializados que parece ser a principal força motriz por trás da aglomeração (Advogados Arvanitis e Haixiong, 2009 apud Krugman, 2010).

Krugman (2010) traz o conhecimento que para compreender os efeitos no bem-estar social de estilo chinês a localização industrial, tem que se pensar em termos de modelos em que economias externas de escala a nível nacional são incorporadas a um sistema de comércio mais amplo, que não é a forma como eu estava a pensar na nova geografia econômica original do trabalho.

Mas não é uma violenta ruptura, e mesmo assim, basicamente, consiste em integrar nova geografia econômica com a nova teoria do comércio (ou melhor, a antiga nova teoria do comércio, ela está em sua quarta década), que foi aonde a nova geografia veio em primeiro lugar. Além disso, orientado para a exportação de localização, ao mesmo tempo em que não são característicos dos finais do século XIX, século XVII na América, era muito habitual nos finais do século XIX e Grã-Bretanha do século XXI.

Concluindo, Krugman (2010) contribui com o conhecimento à nova geografia econômica publicando o seguinte:

Em suma, o que se verifica é que os conceitos e abordagens da nova geografia econômica não estão para trás olhando depois de tudo. Eles são extremamente relevantes para a compreensão da evolução do mundo em economias que mais crescem. A localização na América tornou-se sutil, mas na China e outras economias emergentes, ela é tudo, porém sutis, e existe uma grande possibilidade de o uso de não dormitive-propriedades modelos para fazer sentido a aquilo que vemos. Portanto, há uma geração, dos principais economistas dificilmente que pensavam em tudo sobre o local de produção no interior de cada país; eles mal olhavam para dados locais e regionais

de provas relativas a questões como a força e a natureza das economias externas. A nova geografia econômica foi concebida como um esforço para mudar tudo isso, trazendo os economistas em uma área da melhor maneira que eu sabia como: desenvolvendo bonitos e engenhosos modelos. Há muitas maneiras que os trabalhos em curso na nova geografia econômica podem ser criticados; uma dessas críticas válidas é a incapacidade de prestar atenção suficiente para os trabalhos de geógrafos econômicos mais tradicionais. Mas os economistas pensam sobre a localização e a estrutura espacial como sendo progressos significativos.

3.6.1 índice FIRJAN de desenvolvimento municipal para Porto Velho.

A Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro com a intenção de contribuir com uma gestão pública eficiente e democrática lançou em 2012 o Índice Firjan de Gestão Fiscal – IFGF. Uma ferramenta de controle social que tem como objetivo estimular a cultura da responsabilidade administrativa, possibilitando maior aprimoramento da Gestão Fiscal dos municípios, bem como o aperfeiçoamento das decisões dos gestores públicos quanto à alocação dos recursos. (FIRJAN, 2014).

O IFGF possibilita o debate sobre um tema de grande importância para o país: a forma como os tributos pagos pela sociedade são administrados pelas prefeituras. O índice é construído a partir dos resultados fiscais das próprias prefeituras, ou seja, pelas informações de declaração obrigatória e disponibilizadas anualmente pela Secretaria do Tesouro Nacional (STN). Com base nesses dados oficiais, o IFGF analisa os 5.164 municípios onde vivem 181.474.298 pessoas, que representa 96% da população do Brasil. (FIRJAN, 2014)

O IFGF tem uma leitura dos resultados bastante simples, com uma pontuação que varia entre 0 e 1, significando que, quanto mais próximo de 1, melhor gestão fiscal do município para o ano em observação. O índice é composto por cinco indicadores: Receita própria; Gastos com pessoal, Investimentos, Liquidez e Custo da Dívida. O índice possui uma metodologia que permite tanto comparação relativa quanto absoluta, isto é, o índice não se restringe a uma fotografia anual, podendo ser comparado ao longo dos anos. Dessa forma, é possível especificar, com precisão, se uma melhoria relativa de posição em um ranking se deve a fatores específicos de um determinado município ou à piora relativa dos demais. (FIRJAN, 2014).

Dentro do contexto do IFGF em 2012, foi desenvolvido o Índice Firjan de Desenvolvimento Municipal – IFDM, passando a ser uma referência para o acompanhamento do desenvolvimento socioeconômico brasileiro. O IFDM realiza o acompanhamento de três áreas: Emprego e Renda, Educação e Saúde, utilizando exclusivamente de estatísticas públicas oficiais, possui uma leitura simples, assim como o IFGF, varia de 1 a 0, sendo que quanto mais próximo de 1, maior o desenvolvimento da localidade, sua metodologia possibilita determinar com precisão se a melhoria relativa ocorrida em determinado

município decorre da adoção de políticas específicas, ou se o resultado obtido é apenas reflexo da queda dos demais municípios.(FIRJAN, 2012).

3.7 Produto Interno Bruto (PIB) Para Porto Velho: Informações Econômicas.

Um sistema de indicadores municipais com informações econômicas e sociais é importante instrumento para o planejamento de políticas públicas. Com a promulgação da Constituição Federal de 1988, que deu mais responsabilidade e autonomia aos municípios, ampliaram-se as demandas por informações econômicas padronizadas e comparáveis em nível municipal, tanto por parte de agentes públicos e privados, quanto por estudiosos da economia, e pela sociedade em geral. Os resultados do PIB dos Municípios permitem identificar as áreas de geração de renda, produzindo informações que captam as especificidades do País.

Desde 1996 o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE em parceria com as Secretarias Estaduais de Planejamento, Órgãos Estaduais de Pesquisa e Estatística e a Superintendência da Zona Franca de Manaus – SUFRAMA, desenvolve um programa de trabalho com a finalidade de elaborar as Contas Regionais do Brasil, com metodologia integrada à do Sistema de Contas Nacionais.

Após o ano 2000 o IBGE assumiu a responsabilidade de criar as condições técnicas para a expansão do programa das Contas Nacionais e Regionais, realizando então a estimativa do Produto Interno Bruto – PIB dos municípios, fazendo uso de metodologia integrada à das Contas Nacionais e Regionais. O programa consolidou-se a partir de 2005 ao publicar os resultados do PIB dos municípios para o período de 1999 a 2003, nos anos que se seguiram a publicação passou a obedecer a uma intercalação de 2 anos, sendo adotada uma política que exige a revisão dos resultados do ano anterior como requisito fundamental para o aprimoramento da qualidade e confiabilidade da informação.

Esse projeto trouxe subsídios que permitem a análise da economia municipal. É necessário ressaltar que no início de 2007 uma nova série do Sistema de Contas Nacionais foi divulgada, resultando em um aperfeiçoamento nas Contas Regionais e no PIB dos municípios na mesma magnitude das ocorridas nas Contas Nacionais, este fato ocorreu devido à necessidade de manter as metodologias compatíveis e comparáveis. Houve um aperfeiçoamento do programa e outras inovações metodológicas foram introduzidas para a construção desta nova série, onde se destacam a adoção de uma classificação de produtos e atividades compatível com a Classificação Nacional de Atividades Econômicas - CNAE 1.0 e a revisão de conceitos e definições adotadas.

De acordo com o IBGE (2013), o objetivo é ministrar estimativas do PIB dos municípios, a preços correntes, e do valor adicionado bruto da Agropecuária, Indústria, Serviços, Administração, saúde e educação públicas e seguridade social, a preços correntes, de acordo com as orientações internacionais expressas pela Organização

das Nações Unidas – ONU, Banco Mundial, Comissão das Comunidades Europeias – EUROSTAT, Fundo Monetário Internacional – FMI e Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico – OCDE, reunidas no manual System of National Accounts 1993, e compatível com as metodologias das Contas Regionais e das Contas Nacionais do Brasil, onde as estimativas obtidas são comparáveis entre si.

Nessa ótica a metodologia para o cálculo do PIB dos municípios tem base na distribuição, pelos municípios, do valor adicionado bruto, a preços básicos, em valores correntes das atividades econômicas obtido pelas Contas Regionais do Brasil (IBGE, 2013). O Trabalho tem fundamentação na identificação de variáveis que permitam distribuir o valor adicionado bruto a preços correntes das atividades de cada Unidade da Federação, pelos seus respectivos municípios.

São consideradas as seguintes atividades econômicas: agricultura; pecuária; silvicultura e exploração florestal; pesca; indústria extrativa; indústria de transformação; produção e distribuição de eletricidade, gás, água, esgoto e limpeza urbana; construção civil; comércio e serviços de manutenção e reparação; serviços de alojamento e alimentação; transportes, armazenagem e correio; serviços de informação; intermediação financeira, seguros e previdência complementar e de serviços relacionados; atividades imobiliárias e aluguéis; serviços prestados às empresas; administração, saúde, e educação públicas e seguridade social; educação mercantil; saúde mercantil; serviços prestados às famílias e associativos e serviços domésticos (IBGE, 2013).

3.8 Modelagem Econômica para Porto Velho – RO.

Em 30 de outubro de 1913, a Lei n. 741, cria o Termo de Porto Velho, pertencente à Comarca de Humaitá, deixando a cargo do Poder Executivo traçar seus limites, ação que foi realizada por meio do Decreto nº 1.061 de 17 de março de 1914 (IBGE, 2014).

O Município de Porto Velho foi criado em 2 de outubro de 1914 pela Lei nº 757 e sede na povoação já existente, com autorização para que o Poder Executivo entrasse em contato com o Governo Federal, a Companhia Madeira – Mamoré Railway Co. e os proprietários de terras particulares da localidade, para a fundação da vila, realizando o aproveitamento das obras de saneamento já existentes e realizadas por aquela Companhia, ocorrendo a instalação da vila em 24 de janeiro de 1915. Em 7 de setembro de 1919 a Vila de Porto Velho foi elevada a categoria de Cidade (IBGE, 2013).

O decreto federal nº 5.812, de 13 de setembro de 1943, criou vários territórios federais, entre aqueles o Território Federal do Guaporé, constituído por áreas desmembradas dos estados do Amazonas e Mato Grosso, com extensão territorial de 243.044 Km², situando-se na Amazônia Ocidental, ao sul do estado do Amazonas e a nordeste do estado do Mato Grosso.

Em seguida pelo decreto-lei nº 5.839 de 21 de setembro de 1943, que dispôs sobre a administração dos Territórios Federais elevou o município de Porto Velho à categoria de Capital do Território Federal do Guaporé, que em homenagem ao Marechal Cândido Mariano da Silva Rondon, a Lei nº 21.731 de 17 de fevereiro de 1956 passou a denominar-se Território Federal de Rondônia e deste território passaram a fazer parte os municípios de Porto Velho e Guajará-Mirim. Por meio da Lei complementar nº 41, de 22 de dezembro de 1981, o Território Federal de Rondônia foi elevado à categoria de Estado, mantendo o Município de Porto Velho como Capital. (IBGE, 2013) e (Teixeira, 2001).

De acordo com Teixeira (2001), a ocupação em Santo Antônio do Madeira ocorre pela primeira vez no século XVIII, por volta do ano de 1722, pelo Padre Jesuíta João Sampaio, que chegou até aquelas cachoeiras partindo das proximidades da foz do Jamari, o Padre Jesuíta encontrava-se na região acompanhando a expedição do Bandeirante Francisco Melo Palheta.

Sendo Santo Antônio a primeira cachoeira encontrada, registra o fim do trecho plenamente navegável do Madeira, iniciando a partir deste ponto um trecho acidentado que vai até o município de Guajará-Mirim. Foi identificada a cachoeira de Santo Antônio como um ponto importante, porque necessariamente era ponto para reabastecimento e para preparação para uma viagem mais difícil. A primeira tentativa foi de fundar uma missão jesuítica que poderia servir de descanso e reabastecimento, mas a região era excessivamente insalubre, cercada por pântanos e extremamente suscetível à malária, mas logo no início do século XIX com a tentativa da construção da estrada de ferro Madeira Mamoré veio a deixar isso bem claro, pela quantidade de mortos que ocorreria. Então Santo Antônio marca um processo de ocupação muito difícil.

Ainda em Teixeira (2001), em 1907 tem início efetivamente a construção do empreendimento que contribuiu com a construção da identidade dessa região, isto é, a Estrada de Ferro Madeira Mamoré, que foi retomada e concluída sob o comando do empresário norte-americano Percival Farquar, com negócios em toda a América Latina. Observando a insalubridade de Santo Antônio que já era povoada, já era uma vila, ele desloca o início da ferrovia 7 km rio abaixo, uma região que havia também sido abandonada pelos militares, uma área de inundação que os militares primeiro ancoraram e fizeram um porto e abandonaram e conheceram aquela região como porto velho.

Figura 2 – Porto Velho 1910.



Figura 3 – Cais de Porto Velho 1910.

Fonte: (RONDÔNIA, 2008).

A história de Porto Velho passa e acontece em grande parte em função do rio Madeira, dito o processo de ocupação, e favorece o processo de estabelecimento da sociedade aqui, e pode-se falar como Leandro do Tocantins falou “aqui o rio comanda a vida”.



Figura 3 – Cais de Porto Velho 1910.

Fonte: (RONDÔNIA, 2008).

E agora mais de cem anos depois, é o rio Madeira de novo quem dita um novo processo de ocupação, um novo processo de aproveitamento econômico, um conflito social

a respeito do debate ambiental, do que vai ser feito do que vão acontecer então as usinas surgem como uma necessidade de nível nacional.

Registra-se na história de Porto Velho dois fatos importantes ocorridos no início dos anos noventa, que foram a desativação do garimpo de ouro do Rio Madeira, que também foi um fator de desastre ambiental sem precedente, principalmente com a poluição por metais pesados ao longo do rio e o término das obras da hidroelétrica de Samuel, essas duas interrupções da ascensão econômica da região representaram o desemprego e a exclusão social de milhares de pessoas uma boa parte desta gente foi embora, foi para outras áreas, buscando novas oportunidades.

Mas um segmento importante ficou e construiu a periferia de Porto Velho, que nós conhecemos hoje, uma periferia violenta, completamente insalubre, sem nenhum tipo de infraestrutura, essa gente ficou desempregada, ao longo de muitos anos, e aí, a gente pergunta: É justo exigir um novo sacrifício dessa camada da população, é justo exigir que eles sejam favoráveis a causa ambiental e não a oportunidade que está se apresentando?

Vários ciclos econômicos e produtivos compuseram o cenário do desenvolvimento regional de Rondônia, o primeiro ciclo econômico foi o ciclo da borracha que teve início por volta de 1877, marcando a migração de nordestinos para exploração dos seringais e a produção do látex, produto com extenso mercado para exportação. O mercado internacional do látex sofreu um declínio a partir de 1912, atingindo o seu ápice em 1918, ocasionado pelo preço praticado no mercado internacional pela Malásia.

Em 1942, por ocasião da Segunda Guerra Mundial tem início um segundo ciclo da borracha, em função da ocupação das tropas japonesas nos seringais da Malásia, atraindo mundialmente todos os compradores de látex para a Amazônia. O governo brasileiro, representado por seu presidente Getúlio Vargas convocou trabalhadores para trabalharem na extração e produção de látex, foi neste período que surgiu o soldado da borracha, ocupando assim novamente os vales amazônicos.

A descoberta de estanho ocorrida em 1952 traz um novo cenário econômico para o município de Porto Velho, surgindo assim o ciclo da extração da cassiterita, que assim como o látex é compreendido por dois períodos, o primeiro período foi caracterizado pela garimpagem manual, ocorrendo até a normatização do governo federal em 31 de março de 1971, quando decretou a proibição da extração manual da cassiterita, iniciando a partir de então o segundo período do ciclo da extração da cassiterita o período da garimpagem mecanizada.

A década de 70 marca o início de um novo ciclo para o estado de Rondônia, chegando migrantes, em sua maioria, oriundos das regiões Sul e Sudeste, principalmente dos estados do Paraná, Espírito Santo e Minas Gerais, dando início ao plantio das lavouras e formação de pastos, trazendo e instalando as indústrias madeireiras, estes segmentos foram os principais responsáveis pela geração de emprego e renda ao longo da década de 80 e mantém uma relativa importância para a economia do estado nos dias atuais.

3.9 Rio Madeira e o Cenário de Transformação Socioeconômico

De forma geral, o Grupo Santo Antônio Energia no ano de 2007, material constante no vídeo institucional da UHE Santo Antônio Energia, intitulado “Vozes do Madeira”, em suas abordagens sobre a história e colonização da região do município de Porto Velho, destaca fatos relevantes para a pesquisa aqui desenvolvida, trazendo as questões relacionadas à construção da estrada de ferro Madeira Mamoré, ao extrativismo, seguido do período da exploração de ouro no Rio Madeira e afluentes, chegando até a construção da Usina de Samuel no Município de Candeias do Jamari.

De acordo com o narrador estas ocorrências determinaram períodos na história econômica e social do estado de Rondônia e principalmente sua capital o município de Porto Velho, na qual é protagonista destes períodos envolvidos falta de planejamento público, falta de infraestrutura e principalmente utilização de mão de obra não qualificada.

Teixeira (2009) ressalta a importância do Rio Madeira para o município de Porto Velho: “A história regional, ela passa e acontece em grande parte em função do Rio Madeira que dita o processo de estabelecimento da sociedade aqui, e pode-se falar como Leandro do Tocantins falou, aqui o rio comanda a vida.” Além disso, são 102 anos depois das ocorrências da estrada de ferro Madeira Mamoré, novamente o Rio Madeira dita um novo processo de ocupação, um novo processo de aproveitamento econômico, um conflito social a respeito do debate ambiental, do que vai ser feito e também do que acontecerá.

Dessa forma, surgem as usinas como uma necessidade de nível nacional, um projeto inevitável e necessário, mas que precisa ser pensado de forma a impactar o mínimo possível o meio ambiente e as populações que vivem desse rio até hoje.

3.10 UHE de Santo Antônio e o relatório de avaliação ambiental estratégico do complexo do rio Madeira.

Ressalta-se que o Relatório de Avaliação Ambiental Estratégico do Complexo do Rio Madeira elaborado pelo conjunto das empresas: Furnas S.A., Odebrecht e Terraplan em junho de 2005 é o marco inicial para construção das Usinas do Madeira, ao relatar que:

“O desafio está dado”, anunciando que um complexo infraestrutural de quatro usinas hidrelétricas em aproximadamente 4.000 km de hidrovia e 1.700 km de linhas de transmissão, que poderá mudar a história de uma região na Amazônia. Um leque de negociações, decisões e ações aguarda ainda o conjunto de atores públicos, privados e do terceiro setor envolvidos com a região e com o Complexo do Rio Madeira, no médio e longo prazo”.

De maneira que, subsídios à tomada de decisão são necessários, visando adequada inserção do Complexo, a sustentabilidade da região e seu desenvolvimento. Mas de acordo com Rosa e Mendes (2012):

Quando uma usina hidrelétrica é construída ela modifica o território para sua implantação. A construção da barragem implica na inundação de uma grande área. Nesta área vivem pessoas que desenvolvem suas atividades, que dependem desse território para sobrevivência e de repente são obrigadas a se deslocar das terras para a implantação da hidrelétrica.

No relatório está descrito, por hipótese, tenta demonstrar uma abordagem inovadora e atuação participativa dos grupos de interesse que pode ser garantida por meio da Avaliação Ambiental Estratégica, que é um processo que não se encerra ao término desse relatório, deve ir além, onde definições ainda são necessárias a respeito das responsabilidades no processo de planejamento e de implementação de ações e programas ao longo do tempo, partindo de um cronograma estabelecido conforme demandas ambientais sociais, econômicas e institucionais no curto, médio e longo prazo.

Afirma que deverá haver monitoramento para que ocorram atualizações e revisões de informações que alimentem novas discussões e tomadas de decisões de forma transparente, em fóruns, reuniões, etc., de forma a contribuir para constantes avaliações e ajustes.

O Relatório explana em capítulos as etapas iniciais deste macroprocesso. No primeiro capítulo são apresentados os conceitos referenciais de apoio assim como as motivações para a aplicação do instrumento Avaliação Ambientais Estratégicas - AAE ao Complexo do Rio Madeira.

Em seu segundo capítulo trata as características físicas do Complexo e de um conjunto de empreendimentos sinérgicos e concorrentes, é delimitada a região e estudo e feita a análise do quadro referencial básico das condições de sustentabilidade ambiental, econômica, social e institucional; ainda neste capítulo são apresentados e discutidos dois modelos de desenvolvimento existentes nessa região: o modelo endógeno, que se expressa principalmente no Estado de Rondônia e o modelo exógeno, cujas experiências bem-sucedidas estão videntes no Estado do Acre.



Figura 4– Vista aérea da Usina Santo Antônio.

Fonte: Assessoria de Relações Institucionais da Usina Santo Antônio Energia, 2013/2024.

Além disso, na avaliação do Complexo nas políticas setoriais de energia e de transportes, bem como a inserção da região de estudos na política ambiental voltada para a Amazônia. Seguindo no relatório, o quarto capítulo expõe os pressupostos para sustentar a identificação e a análise dos efeitos de longo prazo da implantação do Complexo do Rio Madeira e já no quinto capítulo a abordagem ocorre no sentido da participação social no processo da Avaliação Ambiental Estratégica do Complexo do Rio Madeira.

Por fim, apresenta os subsídios para tomada de decisão, elaborados ao longo do estudo, é composto por descrições dos efeitos da implantação do Complexo do Rio Madeira, antevistos pelo estudo, e as contribuições discutidas com os vários grupos de interesse que participaram do processo em uma série de encontros e workshops, apresentando ainda uma proposta de agenda para continuidade do processo de acordos e alinhamentos para a adequada inserção do Complexo do Rio Madeira.

No Relatório Socioambiental (2010), publicado e divulgado pela Coordenação de Relações Institucionais Santo Antônio Energia, relata o histórico e conceitos da Usina Hidrelétrica de Santo Antônio. De acordo com o relatório o projeto de construção da Usina Santo Antônio começou a ser desenvolvida em 2001, com a realização de estudos geológicos e de engenharia pelo consórcio Furnas-Odebrecht, para identificar o local mais apropriado para sua instalação, bem como a tecnologia de geração de energia indicada

para o Rio Madeira e de menor impacto para as comunidades e a biodiversidade amazônica.

Ainda no Relatório Socioambiental 2010 considera a implantação da hidrelétrica como um novo paradigma em sustentabilidade, publicando o seguinte:

Implantar uma usina hidrelétrica na Amazônia Legal buscando a tripla sustentabilidade: social, econômica e ambiental, é um dos mais instigantes desafios para viabilizar a continuidade do desenvolvimento do país. Cerca de 70% do potencial hidrelétrico ainda não explorado no país encontra-se na Região amazônica, e essa é a forma mais competitiva de obter a eletricidade necessária para garantir o crescimento do Brasil.

É um desafio construir a Usina Santo Antônio dentro de um novo paradigma, que tem como suporte o respeito necessário às populações locais e ao meio ambiente, trabalhando direcionado pelos Princípios do Equador, critérios para concessão de crédito que asseguram o desenvolvimento dos projetos financiados de forma socioambiental responsável.

Consta no Relatório Socioambiental 2010 que os Princípios do Equador, um guia para sustentabilidade, foram estabelecidos em 2002 pelo Banco Mundial, com o objetivo de buscar a implementação de projetos de forma sustentável para garantir equilíbrio ambiental, menor impacto social e prevenção de acidentes. Empresas interessadas em obter recursos no mercado financeiro internacional devem adotar.

Formam os Princípios os seguintes conceitos: Gestão de risco ambiental, proteção à biodiversidade, mecanismos de prevenção e controle de poluição. Proteção à saúde e à diversidade cultural e étnica, sistemas de segurança e saúde ocupacional.

Avaliação de impactos socioeconômicos, incluindo as comunidades e povos indígenas, proteção a habitat naturais com exigência de compensação para populações afetadas. Eficiência na produção, distribuição e consumo de recursos hídricos e uso de energias renováveis. Respeito aos direitos humanos e combate à mão de obra infantil.

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

De outra forma, entende-se não ser possível concluir análise do cenário da modelagem econômica que nasce para provocar e ser ponto de partida, instigando aos pesquisadores, profissionais, agentes públicos e a sociedade em geral, para conhecer, acompanhar, monitorar e mensurar o sistema econômico que envolve todas as estruturas otimizadas da sociedade no entorno do Rio Madeira – RO e suas potencialidades para o Desenvolvimento Regional.

Enquanto ser vivo, involuntariamente estamos inseridos no processo socioeconômico. Consolidando esse pensamento, Furtado (1987) afirma que: para captar a natureza do sistema de economia é necessário ter em conta a evolução das estruturas capitalistas, em que o traço mais significativo dessa evolução se manifesta no papel significativo assumido pelo Estado.

Destarte, as instituições são as restrições que humanamente são concebidas pela estrutura política, econômica e de interação social. Elas consistem de constrangimentos informais (sanções, tabus, costumes, tradições, e os códigos de conduta), e regras formais (constituições, leis, direitos de propriedade).

Ao longo da história, as instituições foram criadas por seres humanos para criar ordem e em troca reduzir a incerteza. Em conjunto com a norma oferece as limitações da economia que definem o conjunto de escolha e, portanto, determinar sobre a transação e os custos de produção e, conseqüentemente, a rentabilidade e a viabilidade de se dedicarem à atividade econômica. Elas evoluem incrementalmente, conectando o passado com o presente e o futuro; sua história em consequência é, em grande parte, uma história de evolução institucional no qual o desempenho histórico da economia só pode ser entendido como parte de uma história sequencial.

As Instituições oferecem a estrutura de incentivos da economia; como essa estrutura evolui, ela molda o sentido da mudança econômica no sentido do crescimento, estagnação ou declínio, está na teoria de North (1971).

Assim, Fukuyama (2005) traz as considerações sobre o Estado: “O fim da história nunca foi um procedimento automático, e um sistema político bem administrado sempre foi sua precondição necessária, Estados fracos ou fracassados constituem a fonte de muitos dos mais sérios problemas do mundo”.

De forma geral, em estudo de caso e pesquisa documental com referência em dados secundários e uma escassa coleta de dados primários, os investimentos das duas UHEs e as compensações socioambientais, e diante da visível otimização na geoeconomia do município de Porto Velho buscando referenciais na teoria do desenvolvimento econômico, ampliando um arcabouço teórico para estudar a mobilidade de capital, trabalho, pessoas e ideias, possibilitando uma verificação das dinâmicas territoriais em todo município, com destaque para área urbana, envolvendo os setores públicos e privados e reconhecendo as ocorrências no comportamento social-econômico, realizando uma relação com os empreendimentos hidroelétricos do Rio Madeira, Rondônia (Brasil).

O objetivo desta pesquisa de identificar os principais fatores e ocorrências que contribuíram de forma favorável ou desfavorável para o desenvolvimento ou crescimento do município de Porto Velho, investigando a relação entre o dinamismo do capital e o desenvolvimento regional municipal, por exemplo, no período compreendido entre 2007 e 2012. A pesquisa resultou na identificação de elevado volume de recursos financeiros, oriundo do governo federal, injetados no município de Porto Velho, não refletindo em bem-estar ou qualidade de vida aos munícipes, gerando mal-estar e um grande sentimento de dúvidas e desconfianças.

Em Porto Velho, há presença de fatores de atratividade para a vinda de novos empreendimentos, há também forças que repulsam a entrada de novas empresas no mercado, alguns fatores são percebidos pelo senso comum, porém, outro conjunto de fatores

não é facilmente percebido ou conhecido, principalmente pelos agentes formuladores de planejamentos e projetos públicos para o desenvolvimento local. Esta pesquisa teve como objetivo geral a identificação da atual situação sócio econômica no município de Porto Velho a partir dos investimentos públicos nas usinas hidrelétricas do Rio Madeira, entre outros investimentos, tendo como base de análise a teoria das aglomerações.

Portanto, ao aplicar a teoria de Krugman (1991) e inicialmente, analisar os dados coletados para análise inicial no período de 2007 a 2012, foi observado que não se aplica ao município de Porto Velho a teoria das aglomerações. Embora o acontecimento das obras das usinas tenha criado um atrativo, que funcionou como uma força centrípeta para novos investimentos, novas empresas e profissionais de todos os segmentos profissionais atraídos pela grande oferta de empregos. O resultado da Modelagem e da pesquisa demonstra que as ações institucionais por parte dos governos funcionaram como uma **força centrífuga**, deixando a mostra um cenário de **falta de governança no município**. Ademais, outros estudos devem ser realizados usando Modelagem e Métricas de avaliação de políticas públicas, para fortalecer a tomada de decisão.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Maria Margarida de. Como preparar trabalhos para cursos de pós-graduação: noções práticas. 6ª edição. São Paulo; Atlas, 2004.

BRASIL. Ministério das Relações Exteriores, Divisão de Programas de Promoção Comercial. Exportação Passo a Passo; Brasília: MRE, 2004.

BRASIL. LEI COMPLEMENTAR N. 101, DE 4 DE MAIO DE 2000.- Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos - Brasília, 2000. Site: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp101.htm.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Dados do Emprego em Rondônia e Porto Velho – 2013 – MTE – CAGED. 2013b.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Indústria e Comércio MDIC. Acesso pela internet em 22 de janeiro de 2014a. Disponível no site: <http://www.mdic.gov.br/sitio/sistema/balanca/>

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. IBGE Cidades. Acesso pela internet em 21 de agosto de 2013c. Disponível no site: <http://www.cidades.ibge.gov.br>.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. IBGE Cidades. Acesso pela internet em 12 de fevereiro de 2014b. Disponível no site: <http://www.cidades.ibge.gov.br>.

CARLOS SÁ, José. NASCENTES, Carla. Informações para a imprensa. Assessoria de Relações Institucionais. Santo Antônio Energia. Porto Velho: CDN, 2013.

COMPENSAÇÕES SOCIAIS. Disponível em site: http://www.energiasustentaveldobrasil.com.br/arquivos/Status_Compensacoes_Sociais_27032012.pdf

COSTA, Darc. América do Sul: integração e infraestrutura. Rio de Janeiro; Capax Dei Editora Ltda., 2011.

COURI, Sérgio. Duas reflexões para uma economia política: a sociedade industrial e seu dilema. 2ª edição. ver. ampl. Brasília, Editora Universidade de Brasília, 2012.

DALPRA, Patrícia. DNA Brasil: Tendências e conceitos emergentes para as cinco regiões brasileiras. São Paulo. Estação das Letras e Cores, 2009.

DUPAS, Gilberto. Espaços para o crescimento sustentado da economia brasileira – Tensões estruturais. São Paulo. Ed. UNESP, 2007.

DUPAS, Gilberto. Meio Ambiente e Crescimento Econômico – Tensões estruturais. São Paulo. Ed. UNESP, 2008.

DUPAS, Gilberto. O mito do progresso; ou progresso como ideologia. São Paulo; Ed. UNESP, 2006.

ECONÔMICO. Parte I: Introducción a las instituciones e al cambio – pesquisado no site http://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/lecturasdeeconomia/article/viewFile/4992/4363?origin=publication_detail. Pesquisado em novembro de 2013

ELETROSUL CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. Site: <http://www.eletrosul.gov.br/home/conteudo.php?cd=857>. Pesquisado em fevereiro de 2013

ENERGIASUSTENTÁVEL DO BRASIL – site: <http://www.energiasustentaveldobrasil.com.br/empresa.asp>
site: http://www.energiasustentaveldobrasil.com.br/arquivos/Status_Compensacoes_Sociais_27032012.pdf. Pesquisado em abril de 2013.

FIERO. A Saga de uma jovem indústria. Livro de 25 anos da FIERO. Porto Velho: FIERO, 2011.

FIERO. Informativo Institucional. Porto Velho: FIERO, 2008.

FIERO, Federação das Indústrias do Estado de Rondônia. Informativo da Indústria divulgado em 26 de agosto de 2008. Porto Velho – RO. 2008.

FIERO, Federação das Indústrias do Estado de Rondônia. Agenda 2020 – Porto Velho-RO, 2010.

FIERO, Federação das Indústrias do Estado de Rondônia. Livro de 25 anos – Porto Velho-RO, 2011.

FILÁRTIGA, Gabriel Braga. Custos de Transação, Instituições e a Cultura da Informalidade no Brasil. Revista do BNDES, Rio de Janeiro, V. 14, Nº 28, P. 121 – 144, dezembro 2007 – pesquisado no site: http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev2804.pdf. Pesquisado em novembro de 2013.

FIRJAN, Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro. IFDM Índice Firjan de Desenvolvimento Municipal. Edição 2012 ano base 2010 – Rio de Janeiro. 2012.

FIRJAN, Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro, IFGF Índice Firjan de Gestão Fiscal. Consultado no site: <http://www.firjan.org.br/ifgf/>; janeiro de 2014. 2014.

FOCHEZATTO, A. Desenvolvimento Regional: recomendações para um paradigma produtivo. O ambiente regional. Três décadas de economia gaúcha, v. 1, 2010.

FUKUYAMA, Francis. Construção de Estados: governo e organização mundial no século XXI. Francis Fukuyama; tradução de Nivaldo Montingelli Jr.. Rio de Janeiro: Rosso, 2005.

FURNAS. Relatório Final de Avaliação Ambiental Estratégica – Complexo Do Rio Madeira – Centrais elétricas FURNAS S.A., Construtora Norberto Odebrecht S.A. e Terraplan – Porto Velho. junho de 2005.

FURTADO, Celso. Transformação e crise na economia mundial. Rio de Janeiro: Paz e terra, 1987.

GALVÃO, Antônio Carlos F.. Política de Desenvolvimento Regional e Inovação: a experiência da União Europeia. Rio de Janeiro: Garamond, 2004.

GARCIA, Renato. Economias externas e vantagens competitivas dos produtores em sistemas locais de produção: as visões de Marshall, Krugman e Porter. Ensaios FEE, Porto Alegre, v 27, n2, p. 301 – 324. Outubro 2006.

GASTALDI, José Petrelli. Elementos de Economia política. São Paulo; Saraiva, 11ª Ed, 1983.

GREMAUD, Amaury Patrick; VASCONCELLOS, Marco Antonio S.; TONETO JUNIOR, Rudinei. Economia brasileira. São Paulo; Atlas 2002.

HEIDEMANN, Francisco G. e SALM, José Francisco. Políticas Públicas e Desenvolvimento. 2ª edição. Brasília; Editora Universidade de Brasília, 2010.

IMMA. Informativo Institucional. Porto Velho: IMMA, 2010.

JUCER. Relatório da JUCER de 11 de julho de 2013 – Dra. Silvia Oriani de Garcia Lima. 2013.

KÖCHE, J. C. Pesquisa Científica: critérios epistemológicos. Caxias do Sul, RS: EDUCS, 2005.

KRUGMAN, P. The New Economic Geography, Now Middle-aged. Publication details, including instructions for authors and subscription information: <http://www.informaworld.com/smpp/title~content=t713393953>. Woodrow Wilson School of Public & International Affairs, Princeton University, Princeton, NJ, USA. Online publication date: 22 December 2010. (Traduzido por Elmir Marques em fevereiro de 2014).

LDO Porto Velho. Lei das Diretrizes Orçamentárias 2007. Prefeitura Municipal de Porto Velho. Pesquisado no site: http://www.portovelho.ro.gov.br/index.php?option=com_docman&Itemid=328. julho de 2013.

LDO Porto Velho. Lei das Diretrizes Orçamentárias 2008. Prefeitura Municipal de Porto Velho. Pesquisado no site: http://www.portovelho.ro.gov.br/index.php?option=com_docman&Itemid=328. julho de 2013.

LDO Porto Velho. Lei das Diretrizes Orçamentárias 2009. Prefeitura Municipal de Porto Velho. Pesquisado no site: http://www.portovelho.ro.gov.br/index.php?option=com_docman&Itemid=328. julho de 2013.

LDO Porto Velho. Lei das Diretrizes Orçamentárias 2010. Prefeitura Municipal de Porto Velho. Pesquisado no site: http://www.portovelho.ro.gov.br/index.php?option=com_docman&Itemid=328. julho de 2013.

LDO Porto Velho. Lei das Diretrizes Orçamentárias 2011. Prefeitura Municipal de Porto Velho. Pesquisado no site: http://www.portovelho.ro.gov.br/index.php?option=com_docman&Itemid=328. julho de 2013.

LDO Porto Velho. Lei das Diretrizes Orçamentárias 2012. Prefeitura Municipal de Porto Velho. Pesquisado no site: http://www.portovelho.ro.gov.br/index.php?option=com_docman&Itemid=328. julho de 2013.

LDO Porto Velho. Lei das Diretrizes Orçamentárias 2013. Prefeitura Municipal de Porto Velho. Pesquisado no site: http://www.portovelho.ro.gov.br/index.php?option=com_docman&Itemid=328. setembro de 2013.

MULLER, Charles C. Os economistas e as relações entre o sistema econômico e o meio ambiente. Brasília; Editora Universidade de Brasília, 1ª reimpressão, 2012.

NORONHA, Vânia. Pensando sobre políticas públicas de lazer para juventudes em contextos de vulnerabilidade social. Belo Horizonte MG, editora, 2009.

NORTH, D. C. Instituciones, cambio institucional e desempenho econômico. Parte I: Introducción a las instituciones e al cambio – pesquisado no site http://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/lecturasdeeconomia/article/viewFile/4992/4363?origin=publication_detail. fevereiro de 2014.

NORTH, Douglass C. Institutions - The Journal of Economic Perspectives, Vol. 5, No. 1. (Winter, 1991), pp. 97-112. Pesquisado no site: <http://classwebs.spea.indiana.edu/kenricha/classes/v640/v640%20readings/north%201991.pdf> – fevereiro de 2014

OLIVEIRA, Alberto de. A economia brasileira: Crítica e razão dualística. 6ª edição. Petrópolis RJ; Editora Vozes, 1988.

OLIVEIRA, Alberto de. Território e mercado de trabalho: discursos & teorias. São Paulo; Editora UNESP, 2006.

OLIVEIRA, Henrique Altemani e LESSA, Antônio Carlos. Política Internacional Contemporânea: mundo em transformação. São Paulo; Saraiva, 2006.

PLANO DIRETOR DE PORTO VELHO. Prefeitura Municipal de Porto Velho e Secretaria Municipal de Planejamento – 2008

Porto Velho Shopping, Informativo institucional de inauguração – Porto Velho 2008.

PPA Porto Velho. 2014-2017 – Plano Plurianual – Prefeitura Municipal de Porto Velho. Projeto Lei n. 15 de 24 de setembro de 2013. Pesquisado no site: http://www.portovelho.ro.gov.br/index.php?option=com_docman&Itemid=713, março de 2014.

Prefeitura Municipal de Porto Velho – Execução do orçamento, pesquisado em julho de 2013 no site: http://www.portovelho.ro.gov.br/contaspublicas/2013/tcu/execucao_

Prefeitura Municipal de Porto Velho. 2013.

RONDÔNIA. Das Trevas Para a Luz – O renascer da Estrada de Ferro MADEIRA – MAMORÉ. Governo do Estado de Rondônia. 2. Edição. NDA Comunicação Integrada, 2008.

RONDÔNIA.a. Rondônia se destaca nas ações para impulsionar o desenvolvimento econômico em 2023. Disponível no site: <https://rondonia.ro.gov.br/rondonia-se-destaca-nas-acoes-para-impulsionar-o-desenvolvimento-economico-em-2023/>. 2023.

ROSA, L. C. F; MENDES, E. P. P. Questões Territoriais E Identitárias: Construção de Usinas Hidrelétricas e Populações Ribeirinhas. XXI Encontro de Geografia Agrária. Uberlândia, MG. 2012. ISSN: 1983-487X.

SACHS, Ignacy. Desenvolvimento, includente, sustentável, sustentado. Rio de Janeiro, Ed. Garamond, 2008;

SANTOS, Milton; A urbanização desigual: A especificidade do fenômeno urbano em países subdesenvolvidos. 3ª edição. São Paulo; Ed. da Universidade de São Paulo, 2010.

SANTOS, Milton. Economia Espacial: Críticas e alternativas. 2ª edição. São Paulo. Ed. da Universidade de São Paulo, 2011.

SANTOS, Milton. Espaço e Método. 5ª edição. São Paulo; Ed. da Universidade de São Paulo, 2012.

SANTOS, Milton. Metamorfoses do espaço habitado: Fundamentos teóricos e metodológicos da geografia. 6ª edição. São Paulo. Ed. da Universidade de São Paulo, 2012.

SANTOS, Milton. Por uma geografia nova: Da crítica da geografia a uma geografia crítica. 6ª edição. São Paulo. Ed. da Universidade de São Paulo, 2008.

SANTOS, Rita de Cássia L. F.. A formação da realidade econômica: para além do pensamento linear. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1999.

SEDES, Secretaria de Desenvolvimento Econômico e Social, Coordenadoria de Apoio ao Desenvolvimento da Produção – Indicadores de Agronegócios 2012, Governo de Rondônia – 2012.

SEN, A. Resources, values and development. Cambridge: Harvard University Press, 1998.

SEVERINO, Antônio Joaquim. Metodologia do trabalho científico. 23ª edição. São Paulo. Cortez, 2007

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Ester Muszkat. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação.– 4ª edição. Florianópolis: UFSC, Atual, 2005.

SILVA, Fernando Fernandes da. As cidades brasileiras e o patrimônio cultural da humanidade. 2ª edição. São Paulo: Petrópolis: Editora da Universidade de São Paulo, 2012.

SILVA, Robson Dias da. Indústria e desenvolvimento regional no Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2012.

SINDFLUVIAL. Comandante Raimundo Nonato, IV Fórum de Hidrovias Já – Projetos, Investimentos e Sustentabilidade da Hidrovia do Madeira. Porto Velho, 2012.

Site: http://books.google.com.br/books?id=_nnMObyrNg8C&pg=PA99&lpg=PA99&dq=tapete+de+cluster+dalton&source=bl&ots=ekC-a2KR-T&sig=XPd_Rhe0McGTicJAVsYNE16_5MqQ&hl=en&sa=X&ei=e6v5UvGBJI_QkQfamIGIBg&ved=0CCgQ6AEwAA#v=onepage&q=tapete%20de%20cluster%20dalton&f=false

SOUZA, Helano Maia de. A natureza, o homem e a economia: considerações, leis e mecanismos de interação e equilíbrio. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1999.

TEIXEIRA, Marco Antônio Domingues e Dante Ribeiro da Fonseca. História Regional: Rondônia. Porto Velho: Rondoniana, 2001.

TEIXEIRA, Marco Antônio Domingues. Vídeo Institucional “Vozes do Madeira”; produzido pelo Grupo Santo Antônio Energia. Porto Velho, 2007.

TELES, Renato – Clusters e Redes de Negócios, Curitiba IESDE Brasil SA. 2008 Site: http://books.google.com.br/books?id=_nnMObyrNg8C&pg=PA99&lpg=PA99&dq=tapete+de+cluster+dalton&source=bl&ots=ekC-a2KR-T&sig=XPd_Rhe0McGTicJAvsYNE165MqQ&hl=en&sa=X&ei=e6v5UvGBJl_QkQfamIGIBg&ved=0CCgQ6AEwAA#v=onepage&q=tapete%20de%20cluster%20dalton&f=false, maio de 2011.

VEIGA, José Eli da. Desenvolvimento Sustentável: o desafio do século XXI. Rio de Janeiro; Garamond, 2010.

VEIGA, José Eli da. Meio ambiente & desenvolvimento. Rio de Janeiro: Editora SENAC São Paulo, 2006.

VICECONTI, Paulo Eduardo Vilchez e NEVES Silvério das. Introdução à economia. 8ª edição. São Paulo. Frase Editora, 2007.

GEOFÍSICA APLICADA À SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO: APLICAÇÃO DA TOMOGRAFIA ELÉTRICA DE RESISTIVIDADE A UM ESTUDO DE CASO NA BAIXADA CUIABANA NO ESTADO DE MATO GROSSO

Data de submissão: 19/10/2024

Data de aceite: 02/12/2024

Marcio Correia de Amorim

Universidade Federal de Mato Grosso
(UFMT)
Cuiabá/MT, Brasil.
<https://orcid.org/0009-0004-3614-5807>

Aplicação da Eletrorresistividade em Barragens

RESUMO: As barragens são estruturas construídas com o objetivo de criar um reservatório, para armazenamento de materiais fluidos ou com elevado teor de água. Esse tipo de estrutura é usado para as mais diversas finalidades dentre as quais se destacam a acumulação de água para a dessedentação, geração de energia ou mesmo a disposição de rejeitos de mineração. Essas estruturas podem ser construídas com o emprego de diversas técnicas e materiais. A indústria da mineração normalmente faz uso de barragens de terra. Contudo, tais barramentos apresentam problemas que, em alguns casos, só podem ser detectados e monitorados, adequadamente, com instrumentação ou métodos de investigação geofísica. Sendo assim, o presente trabalho

objetiva a aplicação do método geofísico da eletrorresistividade para a análise e compreensão da percolação de água no corpo de uma barragem localizada no limite entre os municípios de Poconé e Nossa Senhora do Livramento, Estado de Mato Grosso, bem como a relação desse fenômeno com a segurança desse tipo de estrutura. Os perfis para realização dos ensaios foram construídos na crista, na berma e na base de dois setores da barragem, tendo sido aplicada a técnica do caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo. Como resultado, além da demonstração da viabilidade de emprego desse método para barragens construídas de forma similar à selecionada, foram identificados locais para aprimoramento na investigação geotécnica e no plano de monitoramento, considerando as anomalias de resistividade detectadas.

PALAVRAS-CHAVE: Geofísica; Tomografia de Resistividade Elétrica; Baixada Cuiabana; Barragens de Rejeito; Geotecnia.

GEOPHYSICS APPLIED TO THE SAFETY OF MINING TAILINGS DAMS: APPLICATION OF ELECTRICAL RESISTANCE TOMOGRAPHY TO A CASE STUDY IN THE CUIABANA BAIXADA IN THE STATE OF MATO GROSSO

ABSTRACT: Dams are structures built to create a reservoir for storing fluid or high water content materials. This type of structure is used for the most diverse purposes, among which the accumulation of water for desedimentation, power generation or even the disposition of mining tailings stands out. These structures can be built with the use of various techniques and materials. Mining industry usually use earth dams. However, these dams have problems that, in some cases, can only be detected and monitored properly with instrumentation or geophysical research methods. Thus, the present work aims to apply the geophysical method of electroresistivity for the analysis and understanding of water percolation in the body of a dam located on the boundary between the municipalities of Poconé and Nossa Senhora do Livramento, State of Mato Grosso, as well as the relationship of this phenomenon with security of this type of structure. The profile lines to perform the tests were built on the crest, berm and the base of two sectors of the dam, and the electrical walking technique with a dipole-dipole arrangement was applied. As a result, in addition to demonstrating the viability of employment of this method for dams constructed in a similar way to the selected, places were identified for improvement in geotechnical investigation and monitoring plan, considering the resistivity anomalies detected.

KEYWORDS: Geophysics; Electrical Resistance Tomography; Baixada Cuiabana; Tailing Dams; Geotechnics.

1 | INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas construídas e usadas há séculos, cuja complexidade da metodologia construtiva evoluiu ao longo do tempo. Estas, por sua vez, podem ser construídas com diferentes finalidades e situações desde geração de energia elétrica, controle de cheias, abastecimento, contenção de rejeitos industriais e de mineração, dentre outros (Bento, 2017). As barragens que têm como função o recebimento e armazenamento de rejeito de mineração são, usualmente, denominadas de Barragens de Rejeito (Morgado, 2022).

Os rejeitos, produzidos em grande quantidade, vêm afetando de forma qualitativa e quantitativa o meio ambiente. Esse fato tem gerado uma preocupação cada vez maior nas empresas, que buscam minimizar os impactos ambientais e os custos associados aos processos de contenção desse material. Essa preocupação em dispor sistematicamente os rejeitos, visando minimizar os impactos ambientais e melhorar os aspectos de segurança e economia, faz com que as empresas, optem, cada vez mais, pela deposição desses rejeitos em sistemas de barragens (Espósito, 2020).

No caso das barragens destinadas à acumulação de rejeito de mineração, normalmente são empregadas estruturas de terra para essa finalidade. Estas, por sua vez, têm a vantagem de serem construídas em estágios, na medida em que os rejeitos

são gerados, diluindo custos da construção e operação (Duarte, 2008). As barragens de terra são as mais elementares obras de barragens e normalmente se prestam para qualquer tipo de fundação, desde a rocha compacta, até terrenos construídos de materiais inconsolidados. Esses últimos, aliás, são seu campo típico de aplicação. (Marangon, 2004).

Embora apresentem algumas vantagens, as barragens de terra podem ser acometidas de alguns problemas. Os principais problemas que ocorrem em barragens podem ser associados a falhas de projetos, problemas operacionais e/ou manutenção inadequada (Bertuluci, 2020). Dentre esses problemas, podemos citar erosões superficiais, presença de vegetação, abatimentos, desníveis e erosão interna (*piping*). Tais problemas precisam ser monitorados para evitar que evoluam ao longo do tempo. Dessa forma, é imperativo um controle de construção dessas barragens associado a um monitoramento constante ao longo de sua vida útil para garantir segurança contínua e compatibilidade ambiental (Williamson, 1996 *apud* Espósito, 2020). Quando bem executadas, essas atividades de inspeção e monitoramento apontam, com a devida antecedência ou urgência, a necessidade de reabilitar as barragens que estejam em perigo ou risco de rompimento (ANA, 2016).

Parte dos problemas que afeta as barragens de terra pode ser identificada por inspeção visual. Contudo, problemas relacionados à percolação interna no corpo ou na fundação do barramento são difíceis de detectar. A ruptura por erosão regressiva ocorre de jusante para montante, formando um tubo (*piping*), com carreamento de partículas de solo pelo maciço, devido ao fluxo de água descontrolado de montante para jusante. Nesse cenário, ocorre deslocamento de partículas do barramento que desestabiliza o equilíbrio de forças na matriz do solo e o respectivo estado de tensões no maciço por onde ocorre esse fluxo. O fenômeno é progressivo até a formação de brecha e colapso da estrutura (Ladeira, 2007). Como esse fenômeno ocorre no interior do corpo da estrutura, quando existe algum sinal visível de sua ocorrência (umidade ou surgência na face do talude), normalmente, o processo já se encontra em fase avançada de desenvolvimento. Sendo assim, a detecção desse tipo de anomalia nos seus estágios iniciais só é possível de ser executada por meio de instrumentação e monitoramento. Contudo, em casos onde o projeto de instrumentação seja inexistente ou não esteja adequado à barragem e não exista um plano complementar de monitoramento, esse tipo de problema pode ter sua ocorrência mascarada da equipe técnica responsável pela estrutura.

1.1 Barragens de mineração no Brasil e no Estado de Mato Grosso

Segundo dados disponibilizados em 2023 pela Agência Nacional de Mineração (ANM), por meio do Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM), versão pública, existem, atualmente, no Brasil, 928 barragens de mineração. Desse total, cerca de 50% possuem características que as enquadram nos critérios estabelecidos pela

Lei nº 12.334/2010 para inclusão na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Considerando apenas os números referentes ao Estado de Mato Grosso, há registros da existência 162 barragens de mineração, com cerca de 48% incluídas na PNSB, segundo os critérios estabelecidos pela Lei nº 12.334/2010.

Analisando o mapa da Figura 1, verifica-se que cerca de 77% das barragens existentes em Mato Grosso se localizam nos municípios presentes na Baixada Cuiabana. O termo em questão termo foi usado para designar a área rebaixada compreendida entre o Planalto dos Guimarães, a Província Serrana e o Pantanal Mato-grossense (Almeida, 1964 *apud* Barros *et al*, 1982). Essa região compreende quatorze municípios: Acorizal, Barão de Melgaço, Campo Verde, Chapada dos Guimarães, Cuiabá, Jangada, Nobres, Nossa Senhora do Livramento, Nova Brasilândia, Planalto da Serra, Poconé, Rosário Oeste, Santo Antônio do Leverger e Várzea Grande.

Com base nas informações disponibilizadas no portal de dados abertos da ANM, verificou-se que as barragens de rejeitos de mineração existentes em Mato Grosso estão associadas à exploração de ouro. Por esse motivo, é possível inferir que o material contido no reservatório dessas barragens seja proveniente do processo de beneficiamento de minerais auríferos existentes nesses locais.

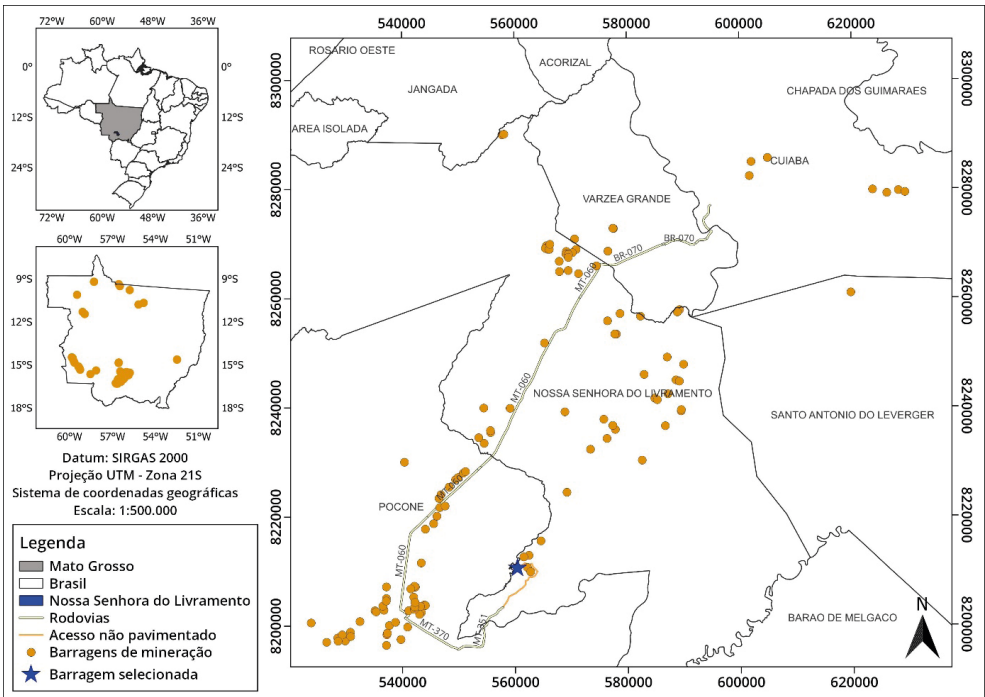


Figura 1. Distribuição das barragens de mineração no Estado de Mato Grosso e em uma região abrangida pelos municípios de Cuiabá, Várzea Grande, Nossa Senhora do Livramento, Poconé e Santo Antônio do Leverger. Além disso, está designado o local da barragem selecionada para o trabalho.

1.2 Histórico da exploração do ouro na baixada cuiabana

Os primeiros descobrimentos de ouro em Mato Grosso ocorreram na região do Alto Paraguai, pela expedição do espanhol Ayolas, em 1536 (Frota, 1942 *apud* Miranda, 1997). Na região da baixada cuiabana, a exploração do ouro se inicia no século XVIII, quando Pascoal Moreira Cabral Leme, em 1718, partindo de Itu (SP) com propósito de fazer o tráfico de índios coxiponé, atingiu o rio Coxipó-Mirim, local onde minerou o primeiro ouro; encontrando índios ornamentados com adereços do metal, chegou facilmente às fontes auríferas. O grupo de Pascoal Moreira Cabral Leme recebeu a adesão dos irmãos Antunes (Gabriel, Antonio, Felipe e João), bandeira que arregimentou os índios Aripoconé e, no local, surgiu o primeiro núcleo de povoamento situado nas margens do rio Coxipó-Mirim, de nome Arraial da Forquilha. Com a descoberta de ouro, sucedeu-se a mineração rudimentar com o uso de ferramentas manuais e simples, ficando a captura de índios relegada a segundo plano (Miranda, 1997).

Na década de 80, uma nova “corrida do ouro” se iniciou na Baixada Cuiabana, transformando alguns municípios dessa região (Cuiabá, Várzea Grande, Santo Antônio do Leverger, Nossa Senhora do Livramento e Poconé) em grandes produtores de ouro, dando origem ao termo de Província Aurífera Cuiabá-Poconé. A princípio, o ouro era lavrado em depósitos secundários, aluviões e lateritas. Com a intensa exploração, os 21 depósitos primários foram expostos, de modo que os veios de quartzo e suas encaixantes, pertencentes ao Grupo Cuiabá, passaram também a ser explorados (Fernandes *et al*, 2006 *apud* Paula, 2019).

1.3 Acidentes envolvendo barragens de mineração

O Boletim nº 121 de 2001 da International Commission on Large Dams (ICOLD), em português Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB), apresenta as estatísticas de 220 casos de acidentes em barragens destinadas à disposição de rejeitos ocorridos entre os anos de 1917 e 2000. Conforme esse trabalho, problemas relacionados à percolação de água dentro do corpo do barramento são a quinta causa mais recorrente dos acidentes envolvendo essas estruturas. Isso se deve ao fato de que o sistema de drenagem interna é uma estrutura crítica que muitas vezes foi negligenciada no passado, resultando em superfícies freáticas perigosamente altas dentro do corpo da barragem de rejeitos. Como se sabe, os taludes externos de uma barragem de rejeitos são muito sensíveis ao nível da superfície freática (ICOLD, 2001).

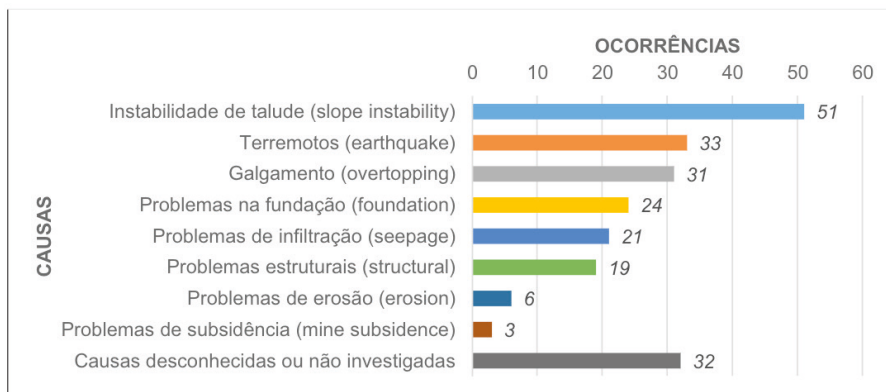


Figura 2. Número de ocorrências das causas de ruptura de barragens de rejeito ocorridas entre os anos de 1917 e 2000 no mundo. Extraído de ICOLD (2001).

Ocorreram no Brasil, até o mês de maio de 2020, o rompimento de nove barragens de rejeito. Destas, oito encontravam-se no estado de Minas Gerais e uma no estado de Mato Grosso, sendo elas: Barragem de Fernandinho, Barragem Rio das Pedras, Barragem Macacos, Barragem de Contenção de Rejeito Cataguases, Barragem de São Francisco, Barragem Herculano Mineração, Barragem Fundão, Barragem da Mina Córrego do Feijão (Brumadinho) e Barragem TB1 (Morgado, 2022). Segundo essas estatísticas, em pelo menos cinco desses casos houve a morte de funcionários das empresas ou de residentes nas comunidades vizinhas a esses empreendimentos.

No dia 5 de novembro de 2015, por volta das 16h00, no município de Mariana/MG, ocorreu o rompimento da barragem de Fundão, liberando um volume estimado de 34 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração, água e materiais utilizados em sua construção (lama), que correspondem a quase 70% do volume total acumulado em Fundão (Bento, 2017). Dentre os sinais evidenciavam a existência de problemas na estrutura, surgências em superfície começaram a aparecer no recuo da ombreira esquerda em várias elevações e ocasiões durante o ano de 2013 (Morgenstern *et al*, 2016). Resumidamente, o rompimento da barragem teve como causas principais a elevada saturação do material que compõe o corpo do barramento, deficiência no monitoramento e danos em vários instrumentos, alteamento em ritmo acima do que as características do material permitiam, obstrução de um dique a falha no sistema de drenagem interna da barragem (Morgado, 2022).

No dia 25 de janeiro de 2019, às 12h35, aconteceu o rompimento da barragem da Mina Córrego do Feijão, da mineradora Vale S.A., localizada no município de Brumadinho, Região Metropolitana de Belo Horizonte. A barragem estava inativa desde 2015 e armazenava 12 milhões de metros cúbicos de lama de rejeitos da mineração de ferro (Oliveira *et al*, 2019). O dique de partida continha características que impediam a drenagem através do pé da

barragem. A falta de recursos de drenagem significativos, juntamente com a presença de camadas de rejeitos finos menos permeáveis resultou em um nível freático elevado. Uma surgência na face da barragem era observada periodicamente, desde a época do quarto alteamento. Dentre as causas que contribuíram para a ruptura da barragem, podemos destacar: taludes demasiadamente íngremes, deficiência no controle da extensão da praia de rejeitos, problemas construtivos e de controle granulométrico do material do barramento, deficiências na drenagem interna, cimentação entre partículas do material do barramento devido à presença de ferro e elevada precipitação regional (Morgado, 2022).

No dia 01 de outubro de 2019, houve um acidente envolvendo esse tipo de estrutura no Município de Nossa Senhora do Livramento, Estado de Mato Grosso. O ocorrido não deixou vítimas fatais e dois trabalhadores ficaram feridos e foram levadas ao hospital com ferimentos leves, também o incidente não afetou nenhuma área de preservação permanente (ANM, 2019).

Dentre as obrigações estipuladas pela ANM em seus normativos para as empresas que operam barragens de mineração, está a realização de inspeções periódicas quinzenais e o encaminhamento das respectivas informações para a referida autarquia, por meio dos Extratos de Inspeção Regular (EIR)¹. Os extratos de inspeções regulares enviados não relataram qualquer ocorrência de anomalias na estrutura da barragem e a mesma sempre possuía pontuações zero em todos itens do estado de conservação desde 21 de setembro de 2019 (ANM, 2019). Nesse caso, não houve a divulgação de relatório conclusivo a respeito das causas da ruptura do barramento.

Analisando os dados a respeito das causas dos acidentes apresentados, é possível perceber que os problemas relacionados à infiltração e percolação no corpo da barragem aparecem de forma recorrente entre as causas. Mesmo no caso onde não houve divulgação do relatório das causas, é possível inferir que o problema causador da ruptura ocorreu no interior do corpo do barramento, tendo em vista que nas informações encaminhadas ao órgão regulador não foram reportadas ocorrências de problemas aparentes.

Uma das formas mais eficazes de evitar a ocorrência e evolução de problemas em barragens de terra é a implementação de um plano de monitoramento adequado. Além disso, esse monitoramento deve começar desde as etapas construtivas da estrutura e seguir até sua completa descaracterização². O projeto de instrumentação deve prever a instalação de instrumentos para, no mínimo, controle das vazões da drenagem interna, dos níveis de água e poropressão no interior do maciço da barragem, das suas fundações e deformações (ABNT, 2013). Dessa forma, torna-se possível o acompanhamento do comportamento do barramento e a detecção antecipada de condições que poderiam acarretar no surgimento futuro de problemas.

1 À época da ruptura da barragem, se encontrava vigente a Portaria nº 70.389/2017. Posteriormente, em fevereiro de 2022, o referido normativo foi substituído pela Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) da ANM nº 95/2022.

2 Segundo a Resolução da Diretoria Colegiada da ANM nº 95/2022, uma barragem descaracterizada é uma estrutura que não recebe, permanentemente, aporte de rejeitos e/ou sedimentos oriundos de sua atividade fim, a qual deixa de possuir características ou de exercer função de barragem.

Sempre que possível, o monitoramento e a identificação de problemas em uma barragem de terra, devem ser realizados causando o mínimo de perturbação à estrutura. A vantagem da aplicação de métodos geofísicos é que ela pode gerar imagens de todo interior da barragem numa correspondência de superfícies. Quando essas seções são associadas e sobrepostas é possível gerar visualizações que compilam os parâmetros em três dimensões. Através do contraste entre as propriedades físicas dos materiais podemos estabelecer o contato entre os diferentes materiais e sua umidade (Silveira, 2021). Assim esse conjunto de métodos traz informações adicionais à instrumentação tradicionalmente usada (piezômetros, marcos superficiais, etc.). Tal condição, ganha ainda mais importância em quando a barragem tem um histórico de ocorrência de anomalias, naquelas onde não se tem informações a respeito de sua construção e operação ou mesmo nos naquelas onde a estrutura está sendo descaracterizada por não apresentar mais condições seguras de operação. Contudo, mesmo barragens descaracterizadas, devem ser monitoradas após a conclusão das obras de descaracterização, objetivando assegurar a eficácia das medidas de estabilização (ANM, 2022).

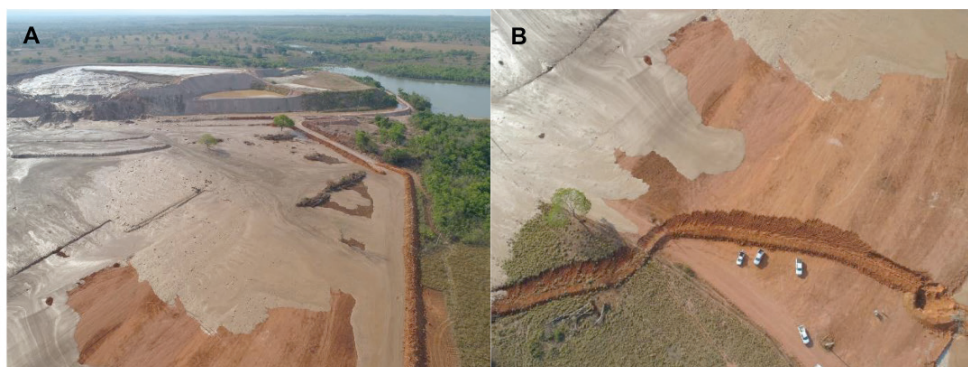


Figura 3. Fotografias aéreas divulgadas na imprensa evidenciam (A) a presença de rejeitos extravasados no rompimento da barragem (barramento do fundo) em Nossa Senhora do Livramento, (B) a construção de trincheiras e diques para a contenção dos rejeitos. Fonte: Portal G1 MT³

2 | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A escolha da baixada cuiabana para a realização do presente estudo teve como principal motivo o fato de que essa região concentra a maior parte das barragens de mineração no estado Mato Grosso. Além disso, contribuiu para essa escolha a importância da mineração de ouro desenvolvida nessa localidade. A seleção da área e da barragem que seriam, efetivamente, objeto do estudo levou em consideração os seguintes critérios: existência de informações históricas construtivas, existência de dados de operação e manutenção, existência de instrumentação instalada e dados das respectivas leituras, proximidade com a capital e possibilidade de obtenção de autorização para a realização

³ Disponível em: <https://g1.globo.com/mt/mato-grosso/noticia/2019/10/02/rompimento-de-barragem-de-rejeitos-de-mineracao-deixa-moradores-sem-energia-em-mt.ghtml>. Acesso em 18 de junho de 2023.

dos levantamentos de campo necessários ao estudo.

2.1 Caracterização Geológica

A área objeto desse estudo se localiza no início do pantanal matogrossense, em uma região limítrofe entre sedimentos da Formação Pantanal, depósitos aluvionares e as rochas do Grupo Cuiabá. Contudo, a barragem e na qual foi realizado o ensaio, se localiza sobre sedimentos e depósitos aluvionares, conforme pode ser observado na Figura 4.

O Pantanal Mato-grossense é constituído pela Formação Pantanal e Depósitos Detríticos e Aluviais (Souza *et al*, 2006). A geologia da Baixada Cuiabana, por sua vez, é constituída por metamorfitos do Grupo Cuiabá, por coberturas detrito-laterítica e pela Formação Pantanal. O Grupo Cuiabá faz parte da Faixa Paraguai do Proterozóico Superior e engloba metaconglomerados, filitos microconglomeráticos, metarenitos, filitos sericíticos e carbonosos, meta-arcóseos, metamargas, lentes de mármore calcítico e dolomítico (Miranda, 1997).

2.1.1 Formação Pantanal

Segundo Miranda (1997), a Formação Pantanal consiste de sedimentos quaternários inconsolidados de natureza areno-argilosas e siltico-argilosa, arenosa (areia média a conglomerática) e aluviões do interflúvio. Segundo Lima *et al* (2017) e Corrêa e Couto (1972), a Formação Pantanal é constituída de uma sequência argilo-arenosa inconsolidada, estratificada horizontalmente, formada por uma alternância de argila cinza e areia média a fina, de cor branca, amarela e vermelha, com classificação regular a boa. Além do quartzo, as areias possuem conteúdo regular de caulim. Entremeados às camadas argilosas e arenosas, são localizados leitos laterizados de pequena espessura de areias e conglomerados finos.

Os depósitos da Formação Pantanal são poucos espessos, com a composição areno-argilosos e siltico-argilosos, com granulometria predominantemente fina ou muito fina, ocorrendo também areias médias a conglomeráticos. Os grãos de quartzo são subarredondados e arredondados, as superfícies polidas com intercalações de níveis argilosos, tendo a fração cascalho, o resultado da movimentação ou dinâmica atual dos rios (Almeida, 1964).

2.1.2 Grupo Cuiabá

O Grupo Cuiabá se estende por toda a Depressão Cuiabana, entre a Província Serrana e a Bacia Sedimentar do Paraná. É caracterizado por uma sequência predominantemente de filitos com intercalações de quartzitos, metagrauvacas, metarenitos, metaparaconglomerados, com raras ocorrências de metacalcários e filitos calcíferos (Calachibete, 2016).

As primeiras descrições das rochas do Grupo Cuiabá ocorreram na década de 60 com trabalhos de individualização litoestratigráfica, e se deve a Almeida, que em 1964, individualizou os Grupos Jangada e Cuiabá (Calachibete, 2016). Posteriormente, foram realizados novos trabalhos de reconhecimento nos domínios de rochas pertencentes ao Grupo Cuiabá, a exemplo daquele efetuado por Dardenne (1980).

Mais recentemente, uma revisão das unidades litoestratigráfica do Grupo Cuiabá foi proposta por Tokashiki e Saes (2008). Nesse trabalho, as oito subunidades litoestratigráficas da classificação feita por Luz *et al* (1980) são agrupadas em quatro unidades estratigráficas, que receberam suas respectivas denominações considerando a literatura geológica sobre a Faixa Paraguai. Dessa forma, a Formação Campina de Pedras é adotada segundo o conceito de Freitas (inédito) englobando as subunidades 1 e 2 de Luz *et al*. (1980) e correspondendo à Unidade Inferior de Alvarenga (1988). A Formação Acorizal (Almeida 1964) é correlacionada com as subunidades 3, 4 e 5 de Luz *et al*. (1980) e à Fácies Intermediária da Unidade Média Turbidítica Glácio-marinha de Alvarenga (1988). Empresta o nome da cidade situada a cerca de 70km a norte de Cuiabá, denominação esta anteriormente adotada por Almeida (1964) como unidade basal do Grupo Jangada, abrigando ainda as formações Engenho, Bauxi e Marzagão. Corresponde parcialmente à Formação Marzagão de Almeida (1964), às subunidades 6 e 7 de Luz *et al*. (1980) e à Fácies Proximal da Unidade Turbidítica Glácio-marinha de Alvarenga (1988). Abriga também a Fácies Guia (mármore calcíticos e dolomíticos aflorantes na Sinclinal da Guia) e os quartzitos que formam o alinhamento de serras que se estende da Serra de São Vicente até Barão de Melgaço (Tokashiki e Saes, 2008).

2.2 Mineralização aurífera

Os depósitos auríferos nos municípios de Nossa Senhora do Livramento e Poconé se localizam no “*trend*” estrutural conhecido como Pirizal – Bento Gomes (Calachibete, 2016). Miranda (1997) e Silva *et al* (2002) identificaram evidências de ocorrência de três fases deformacionais em alguns depósitos da Baixada Cuiabana, sendo elas: Segundo esses autores, essas fases são representadas por foliação metamórfica, dobramentos, falhamentos e veios de quartzo. Silva (2002) propôs ainda que as duas primeiras fases deformacionais apresentam direção NE e a terceira possui direção NW.

No alinhamento estrutural mencionado, os depósitos auríferos são explorados a céu aberto e por pequenos grupos de mineradores. O ouro está associado a veios de quartzo que preencheram sistemas de fraturamento, e disseminados nas encaixantes, proximais a essas feições estruturais. (Calachibete, 2016). Silva *et al* (2002) concluiu que os melhores teores de ouro estão localizados nos veios de direção NW, perpendiculares aos cisalhamentos regionais, de direção NE.

Segundo Miranda (1997) os depósitos auríferos da Baixada Cuiabana encerram forte controle estrutural e estratigráfico descontínuo e distinguem-se em três categorias: depósitos hidrotermais, com o ouro em veios de quartzo com pirita, discordantes, subverticais e largura centimétrica a métrica; depósitos de enriquecimento supergênico, que geraram platôs lateríticos, onde o ouro ocorre na forma de pepitas com distribuição irregular e granulometria variável; e depósitos de *Placers*, com o ouro em depósitos de aluviões e elúvios e colúvios quartzosos, gerados durante os períodos Terciário e Quaternário por constantes processos de aplainamento do relevo.

O empreendimento que abriga a barragem objeto deste estudo é uma empresa mineradora que explora minério de ouro. Segundo as informações disponibilizadas no portal de dados abertos⁴ da ANM, a área se localiza no limite entre os Municípios de Poconé e Nossa Senhora do Livramento, Estado de Mato Grosso, conforme pode ser visualizado na Figura 4. Ainda segundo essas informações, a concessão de lavra que autorizou a lavra no local foi expedida no ano 2000.

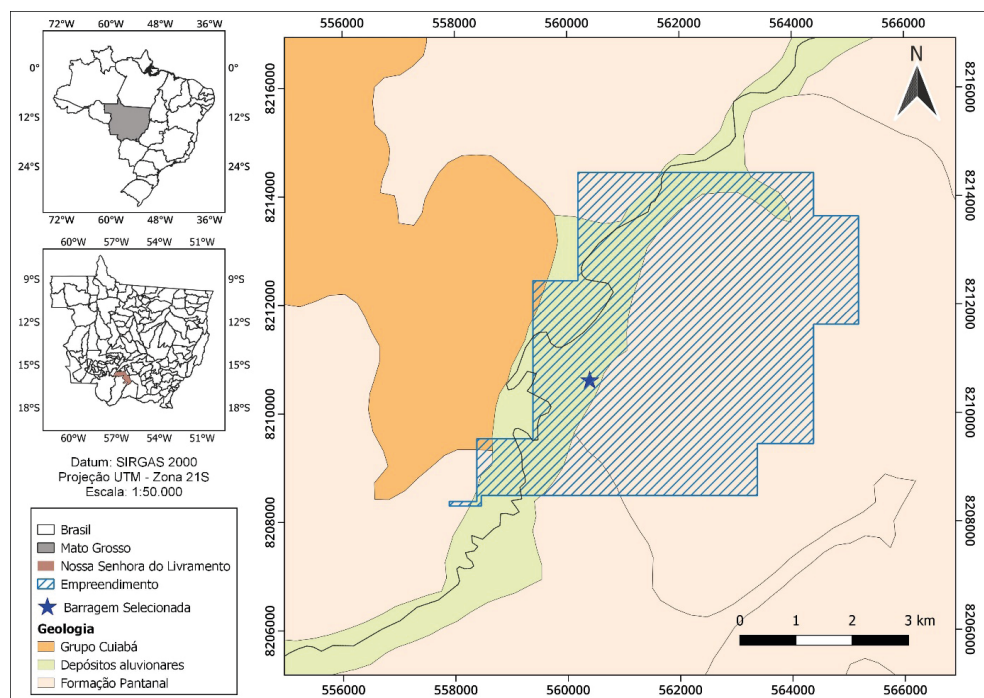


Figura 4. Mapa geológico da área onde se localiza o empreendimento e barragem. A área autorizada para exploração mineral se encontra hachurada na figura. O empreendimento se encontra sobre sedimentos da Formação Pantanal, depósitos aluvionares e pequena porção do Grupo Cuiabá. A barragem, também indicada na figura, se encontra assentada sobre sedimentos.

⁴ Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/acao-a-informacao/dados-abertos>. Acesso em 19 de junho de 2023.

3 | MÉTODOS GEOFÍSICOS

A geofísica é uma ciência que apresenta uma íntima relação com a Física e a Geologia, procurando resolver, a partir da Física, problemas colocados em termos geológicos (Braga, 2006). Em outras palavras, é uma ciência que busca compreender as estruturas do planeta tendo como base a interação entre as propriedades de seus minerais constituintes e campos físicos aplicados a estes. Por esse motivo, o sucesso da aplicação dos métodos geofísicos está diretamente relacionado com a amplitude dos contrastes das propriedades físicas entre o “alvo” e seu “entorno” (Souza e Gandolfo, 2021).

A geofísica aplicada tem evoluído desde os primeiros trabalhos realizados no início do século 20 (Souza e Gandolfo, 2021). Devido à simplicidade e aos custos relativamente baixos, os métodos geofísicos vêm sendo cada vez mais utilizados em diversas áreas do conhecimento, tais como: prospecção mineral, geologia de engenharia, geotecnia, hidrogeologia, monitoramento ambiental, dentre outros. Além disso, com a evolução da tecnologia, em especial, da eletrônica, observa-se a aplicação da geofísica no campo do monitoramento em tempo real de variações das diversas propriedades físicas dos terrenos. O monitoramento de barragens, por meio dos métodos da microssísmica, da eletrorresistividade e do potencial espontâneo, ilustra algumas das possibilidades neste vasto potencial campo de atuação da geofísica aplicada (Souza e Gandolfo, 2021).

3.1 Métodos geoeletricos

Segundo Braga (2006), os métodos geoeletricos, com suas diversidades de modalidades, são muito utilizados no mundo inteiro, atuando nas mais variadas áreas de conhecimento. Além disso, enquanto que os métodos da gravimetria e magnetometria, são considerados de campo natural, estudando as perturbações que determinadas estruturas ou corpos produzem sobre campos preexistentes, os métodos geoeletricos (exceção do potencial espontâneo e magnetotelúrico) são artificiais, ou seja, o campo físico a ser estudado é criado por meio de equipamentos apropriados.

Conforme o próprio nome sugere, os métodos geoeletricos estudam as perturbações que os diversos minerais existentes no planeta provocam em campos elétricos, sejam estes naturais ou induzidos. Alguns autores, como Orellana (1972) e Jakubovskii & Liajov (1980), propuseram classificações para os diferentes métodos geoeletricos, visando a padronização da denominação destes. Essas classificações se baseiam em critérios como o tipo de campo (natural ou induzido), sistema de excitação, tipo de medição, dentre outros. Braga (2006), propõe ainda uma classificação baseada apenas em três critérios: métodos geoeletricos, técnicas de investigação e arranjos de desenvolvimento de campo. Segundo o referido autor, essa classificação, procura revelar os métodos geoeletricos para qualquer tipo de usuário, tornando simples o entendimento de suas várias modalidades existentes,

e conseqüentemente, seus empregos adequados em função dos objetivos e geologia a serem estudadas.

3.2 Método da eletrorresistividade

Os diferentes tipos de materiais existentes no ambiente geológico, apresentam como uma de suas propriedades fundamentais o parâmetro físico resistividade elétrica, o qual reflete algumas de suas características servindo para caracterizar seus estados, em termos de alteração, fraturamento, saturação, etc., e até identificá-los litologicamente, sem necessidade de escavações físicas (Braga, 2006). Dessa forma, a existência de zonas saturadas com água pode gerar pontos onde a resistividade do material, neste caso, o corpo da barragem, será mais baixa que as demais. Contudo na prática, nem sempre o meio estudado é homogêneo. Assim, ao efetuar as medições o parâmetro obtido é a resistividade aparente, resultante da propagação da corrente elétrica nas diferentes camadas do substrato.

3.2.1 Técnica do caminhamento elétrico

A realização de ensaios geofísicos com o emprego do método da eletrorresistividade pode ser feita por diferentes técnicas de campo. Neste trabalho, especificamente, foi utilizada a técnica do caminhamento elétrico. Esta, por sua vez, se baseia na análise e interpretação de um parâmetro geoeletrico (resistividade aparente), obtido a partir de medidas efetuadas na superfície do terreno, investigando, ao longo de uma seção, sua variação na horizontal, a uma ou mais profundidades determinadas (Braga, 2006).

O desenvolvimento do trabalho de campo se dá ao longo de perfis estaqueados, com espaçamento previamente definido, nos quais são fixados eletrodos metálicos. Após a disposição do arranjo no terreno, e obterem-se as leituras pertinentes, todo o arranjo é deslocado para o eletrodo seguinte e efetuadas as leituras correspondentes, continuando este procedimento até final do perfil a ser levantado (Braga, 2006).

3.2.2 Arranjo dipolo-dipolo

Uma vez montado o perfil, nas medições executadas segundo um arranjo dipolo-dipolo o espaçamento entre os eletrodos de corrente (A e B) e eletrodos de potencial (M e N) é mantido fixo durante todo o levantamento, apenas aumentando a separação entre os dipolos (AB e MN). Cada afastamento dos pares de eletrodo representa um nível de profundidade investigado, sendo que quanto maior a distância entre os pares, mais profundo será o nível de investigação (Coura, 2019).

Segundo Braga (2006), a profundidade teórica atingida (Z) em cada nível investigado, é tomada, como sendo $Z = R/2$ (metros), onde R é a distância entre os centros dos dipolos considerados (AB e MN). Entretanto, na prática, essa relação é mais real se for tomada

como sendo aproximadamente $Z = R/4$ (metros).

Após a realização das medições de campo, os dados são, então, filtrados e modelados com o auxílio de programas computacionais específicos. Uma vez concluída essa etapa, as informações podem ser apresentadas por meio de perfis ou mapas.

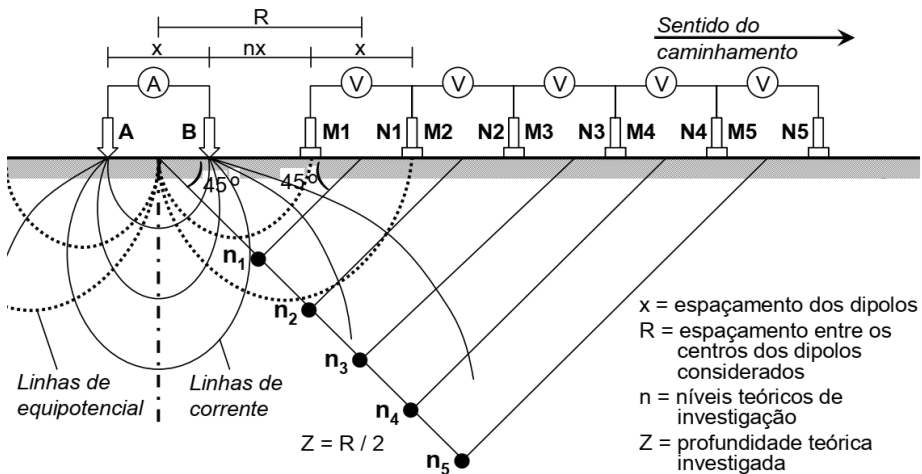


Figura 5. Esquema de aplicação da eletrorresistividade, com a técnica do caminhamento elétrico e arranjo dipolo-dipolo. Adaptado de BRAGA (2006).

3.2.3 Tomografia Elétrica de Resistividade

Segundo Gandolfo (2007), nas últimas décadas, o caminhamento elétrico vem sendo empregado de maneira sistemática, fato que pode ser verificado pelas inúmeras publicações recentes em periódicas nacionais e estrangeiros utilizando e/ou abordando aspectos dessa técnica. A evolução técnica dos equipamentos permite, atualmente, a realização de centenas ou milhares de leituras em cada perfil, aumentando a resolução e a quantidade de dados coletados nos ensaios.

Dentre as terminologias usadas para definir o emprego dessa metodologia, uma bastante difundida é “*Electrical Resistance Tomography*” (ERT) ou “*Tomografia Elétrica de Resistividade*”. No meio técnico científico, sua aplicação tem por objetivo produzir imagens bi ou tridimensionais da resistividade elétrica em subsuperfície. É bastante utilizada em monitoramento, com medidas da variação do parâmetro causadas por meios naturais ou induzidos pela atividade humana. Os ensaios podem ser realizados com o posicionamento dos eletrodos em superfície, variando-se a posição da fonte e do receptor entre esses eletrodos (Gandolfo, 2007).

4 | DESCRIÇÃO DO TRABALHO DESENVOLVIDO

O objetivo principal do trabalho é correlacionar anomalias de resistividade, eventualmente detectadas no corpo da barragem, com a possível ocorrência de processos

de formação de caminhos preferenciais de percolação anormal de água. Conforme já demonstrado no escopo desse trabalho, a instalação desse tipo de processo tem o potencial de desencadear condições que comprometem a segurança da barragem.

O equipamento utilizado para a realização dos levantamentos de medições foi o resistivímetro Syscal Pro Switch 48, fabricado pela empresa Iris Instruments. Esse equipamento possibilita a realização de até 10 leituras simultaneamente, devido à quantidade de canais disponíveis. O processo de realização de leituras é programável, por meio de *software*, e sua execução ocorre de forma automatizada. O equipamento dispunha de cabos com 48 eletrodos e espaçamento padrão de 10 metros.

Além do resistivímetro, foi utilizado um computador, para programação das leituras, *download* das informações coletadas e processamento preliminar dos dados. As informações de posicionamento (coordenadas UTM) de cada eletrodo cravado no solo foram tomadas a partir do Sistema GNSS implementado em receptor portátil de geolocalização Trimble Geo 7x. Para cada eletrodo cravado no solo foram tomados um par de coordenadas UTM com a taxa de amostragem de 1 registro por segundo, onde cada eletrodo foi medido por 5 segundos. Os dados foram armazenados na memória interna do dispositivo para todos perfis e ao final do processo, a sua totalidade foi descarregada em um notebook por meio do software GPS *Pathfinder Office*, versão 5.9. Aplicando-se o processamento de sinal para a correção diferencial, tomando como referência a RBMC Sesc Pantanal, obteve-se mais de 85% do conjunto de dados com a precisão menor que 50cm.

4.1 Seleção da barragem objeto do estudo

Considerando as informações apresentadas no item 1.1 e o escopo do trabalho, inicialmente, foi elaborada uma relação de potenciais barragens de rejeito, contendo, inicialmente, 10 empreendimentos. Dentre aquelas pré-selecionadas, foi escolhida uma, localizada no limite entre os municípios de Poconé e Nossa Senhora do Livramento, que seria, efetivamente, objeto do estudo.

Segundo as informações disponibilizadas pela ANM, na versão pública do SIGBM⁵, Trata-se de um barramento do tipo *Pond*, no qual, devido à topografia, é necessária a construção em forma de anel, para fechamento da topografia e formação de reservatório. Além disso, o respectivo cadastro indica que essa barragem começou a ser construída há cerca de 20 anos atrás.

Ao longo de sua vida útil, a barragem em questão passou por diversas modificações estruturais, dentre as quais podemos relacionar: construção de novas seções, modificações no reservatório, com o soterramento de taludes antigos pelo rejeito, construção de bermas de reforço e, principalmente, alteamentos, que são realizados de forma contínua visando a

⁵ Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/BarragemPublico/Detalhar/783A56C5302B699711CB57C16E5F-D4B3E743862979B3173751C28338EC2D0C1B>. Acessado em 19 de junho de 2023

adequação da capacidade de armazenamento às necessidades de disposição de rejeitos do empreendimento. Segundo as informações contidas nos projetos da barragem, o sistema de monitoramento é composto por 04 medidores de nível d'água (MNA's), destinados ao monitoramento da altura da linha freática em seu corpo, dentre outros instrumentos, como marcos superficiais e réguas linimétricas.

4.2 Descrição da etapa de campo

Considerando o fato de que a barragem é construída em sistema de dique fechado, onde todas as estruturas que formam o reservatório são construídas e alteadas, verificou-se a necessidade de execução de levantamento geofísico em várias partes do barramento, conforme indicado na Figura 6. Dessa forma, seria possível a compreensão das condições não apenas na seção principal, mas, em outras partes da estrutura. Segundo essa premissa, foram definidos seis perfis para os levantamentos geofísicos. Estes, por sua vez, foram posicionados na crista e na berma intermediária da seção principal e da seção adjacente. Além disso, foram montados, também, dois perfis, localizados na base dessas seções, para que fosse possível compreender melhor a interface e as diferenças entre o barramento construído e a respectiva fundação.

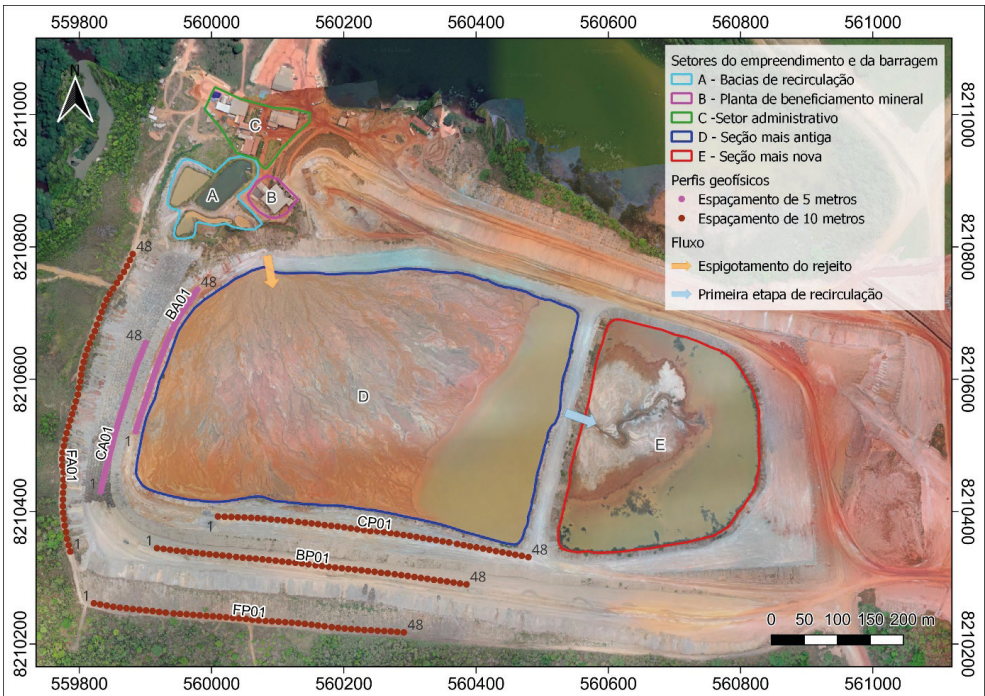


Figura 6. Ortomosaico da área da barragem. As imagens foram obtidas com uso de uma aeronave remotamente pilotada (ARP), modelo Dji Mavic 2 Pro, a uma altura de 200 metros. Os números nos perfis indicam a posição do primeiro de do último eletrodo em cada um.

A seleção do método empregado no ensaio geofísico tomou como base a sugestão contida na Norma ASTM D6429-99, que propõe critérios para a seleção dos métodos geofísicos mais adequados para os diferentes tipos de trabalhos e objetivos desejados. Além disso, levou em consideração, também, outros casos nos quais esse tipo de trabalho foi desenvolvido, da natureza das anomalias que se desejava investigar e também dos parâmetros geométricos da barragem. Dessa forma, a etapa de levantamentos geofísicos foi realizada com o emprego do método da eletrorresistividade, com a técnica de caminhamento elétrico e arranjo dipolo-dipolo.

A metodologia utilizada foi selecionada considerando que as anomalias eventualmente detectadas estão relacionadas com o fluxo de água no interior do corpo da barragem. Este fluxo ocorre de montante para jusante de forma perpendicular ao alinhamento da seção de barramento. Por essa razão, conforme esquema mostrado na Figura 5, considerando as dimensões da barragem e a topografia do local, a técnica de caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo se mostrou a mais adequada para esse tipo de ensaio.



Figura 7. Preparação e montagem dos perfis (A). Umidificação dos pontos de cravação dos eletrodos com solução salina para redução da resistência de contato (B). Equipamento montado e pronto para a realização das injeções de corrente e realização das medições de resistividade (C). Coleta das coordenadas UTM de localização dos eletrodos ao longo do perfil (D).

A realização do ensaio buscou seguir, dentro do que foi aplicável ao presente trabalho, as orientações contidas na Norma ASTM D6431-18, que propõe critérios para o emprego do método da eletrorresistividade. O espaçamento dos eletrodos e o comprimento das seções foi definido com base nas informações provenientes das etapas de levantamento planialtimétrico, no comprimento de cada trecho investigado e na profundidade teórica de investigação desejada em cada local. Além das informações de resistividade, foram coletadas também as informações de geolocalização da posição dos eletrodos.

Durante a realização do ensaio, foram adotadas todas as medidas para que houvesse o mínimo de ruído e interferências nas leituras. Além disso, buscou-se a manutenção da resistência de contato dentro de níveis considerados aceitáveis, para que esse parâmetro não viesse a ter influência sobre as medições realizadas.

PERFIL	LOCAL	ELETRODOS	ESPAÇAMENTO	COMPRIMENTO	DIREÇÃO
CP01	Crista da seção principal	48	10 metros	480 metros	Leste - Oeste
BP01	Berma da seção principal	48	10 metros	480 metros	Leste - Oeste
FP01	Base da seção principal	48	10 metros	480 metros	Leste - Oeste
CA01	Crista da seção adjacente	48	5 metros	240 metros	Norte - Sul
BA01	Berma da seção adjacente	48	5 metros	240 metros	Norte - Sul
FA01	Base da seção adjacente	48	10 metros	480 metros	Norte - Sul

Tabela 1. Detalhes dos perfis construídos para a realização dos ensaios geofísicos.

Durante a realização do ensaio, foram adotadas medidas para que a resistência de contato atingisse os menores valores possíveis, conforme demonstrado na Figura 8. Isso foi feito para que esse parâmetro não interferisse nas medições.

PERFIL	RESISTÊNCIA DE CONTATO kOhm		ELETRODOS ANÔMALOS
	MÍNIMO	MÁXIMO	
CP01	5,12	7,20	39, 40, 41 e 42 (resistência superior a 100kOhm)
BP01	0,69	4,50	Não houve
FP01	0,61	2,63	Não houve
CA01	6,19	14,22	Não houve
BA01	1,08	4,60	Não houve
FA01	0,33	4,20	36 (66,87kOhm), 37 (60,71kOhm) e 41 (51,37kOhm)

Tabela 2. Detalhes dos valores da resistência de contato obtida para cada perfil.

5 | MODELAGEM DAS SEÇÕES E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Durante a realização dos ensaios estatísticos, é possível que ocorra a obtenção e leituras errôneas, que não correspondem efetivamente aos dados de resistividade existentes no meio geológico analisado. Sendo assim, é necessário que o conjunto de dados, coletados na etapa de campo, seja submetido a um tratamento baseado na aplicação de metodologias estatísticas para identificação de leituras incorretas e *outliers*, bem como no processamento de seções por meio de métodos de inversão 2D.

5.1 Filtragem estatística dos dados

A primeira etapa do processamento dos dados consistiu na eliminação das leituras que apresentaram dados com medições de resistividade fisicamente incoerentes ou com desvio padrão superior a 5%. Após a eliminação desses dados, foram agregadas as informações de geolocalização dos eletrodos e foi realizada a exportação do conjunto de dados para o formato de arquivo compatível com o *software* Res2Dinv, versão 4.07, no qual foi executada a próxima etapa de processamento.

PERFIL	MEDIDAS EFETUADAS EM CAMPO	MEDIDAS FILTRADAS NA 1ª ETAPA	MEDIDAS FILTRADAS NA 2ª ETAPA	MEDIDAS EFETIVAMENTE UTILIZADAS	PERCENTUAL DE MEDIDAS UTILIZADAS	PROFUNDIDADE TEÓRICA DE INVESTIGAÇÃO
CP01	2.628	402	325	1.901	72,34%	41 metros
BP01	2.213	2	30	2.181	98,55%	37 metros
FP01	1.580	30	32	1.518	96,07%	24 metros
CA01	2.491	213	407	1.871	75,11%	30 metros
BA01	2.435	30	71	2.334	95,85%	30 metros
FA01	1.580	21	53	1.506	95,31%	24 metros

Tabela 3. Comparativo entre as medidas coletadas em campo e aquelas efetivamente utilizadas após os processos de filtragem estatística.

A filtragem de dados não ocorreu apenas na primeira etapa de processamento. Ela também foi executada durante a segunda fase, na qual estava sendo realizada a geração das seções de resistividade. Nesse caso, os dados foram filtrados até que fosse obtido o melhor ajuste, comparando as informações estimadas pelo programa e aquelas obtidas a partir das leituras em campo. Vale salientar que, em todas as etapas de filtragem, buscou-se a preservação do máximo de medidas possível, com vistas a não interferir em eventuais anomalias possivelmente detectadas durante a realização do ensaio.

A Tabela 3 apresenta a quantidade de medidas que foram realizadas em campo e traz uma comparação com o número de dados que foram filtrados em cada etapa de processamento destes. Nota-se, então, que em todos os perfis houve a preservação de, ao menos, 70% dos dados, mesmo considerando os parâmetros apresentados e a obtenção de ajuste estatístico adequado. Além disso, considerando o grande volume de dados coletados durante a realização do ensaio, as medições filtradas não interferiram na geração das seções e na detecção de anomalias nestas.

5.2 Geração das seções de resistividade por meio do processo de inversão 2D

Considerando que os ensaios geofísicos medem indiretamente propriedades do meio estudado, se torna necessária a aplicação de ferramentas físico/matemáticas que permitam obter as propriedades físicas dos materiais em subsuperfície a partir de suas respostas físicas. Uma das ferramentas mais utilizadas é a inversão de dados. Através da inversão é possível determinar os parâmetros geológico-geofísicos que estão contidos nos dados, que de outra forma não poderiam ser obtidos a partir da análise direta deles (Bortolozo, 2016).

Para este trabalho, foi utilizado o processo de inversão 2D. Como resultado, é possível obter seções bidimensionais baseadas nos dados modelados provenientes das medições efetuadas em campo. Posteriormente, essas seções foram interpretadas, considerando as particularidades do meio estudado, buscando a formação de um entedimento geológico, geotécnico e estrutural das informações ali apresentadas.

A geração das seções foi efetuada com o emprego do *software* Res2Dinv, versão 4.07, considerando os dados filtrados apresentados na Tabela 02. O processo de inversão foi realizado com o emprego do método dos mínimos quadrados, utilizando um algoritmo baseado em diferenças finitas e aplicação de restrição de suavidade. Segundo Gandolfo (2007), essa metodologia procura um modelo suavizado que minimiza a soma do quadrado das variações espaciais do modelo de resistividade (“rugosidade” do modelo) assim como o “erro” (diferença entre o dado medido e o calculado). Assim, é possível remover valores de resistividade espúrios que podem ocorrer devido a discretização em elementos menores do que a resolução espacial dos dados (Rangel, 2018). O critério de parada escolhido para limitar o número de iterações foi a convergência do erro quadrático médio (RMS) para valores percentuais abaixo de 5% e foram realizadas etapas de filtragem para eliminação de *outliers*.

Objetivando a padronização da exibição das seções e uma melhor interpretação, as seções de resistividade foram geradas segundo uma mesma escala de cores, com um intervalo que abrange todos os valores medidos.

5.3 Interpretação das seções de resistividade

Após a confecção das seções de resistividade, foi feita a interpretação das informações nelas apresentadas. Considerando que os perfis se localizam em diferentes partes do barramento e a possível existência de estruturas geológicas na fundação, foram elaboradas seções de interpretação separadamente. Para melhor compreensão, a escala vertical foi mantida em valores referentes à altitude registrada no local.

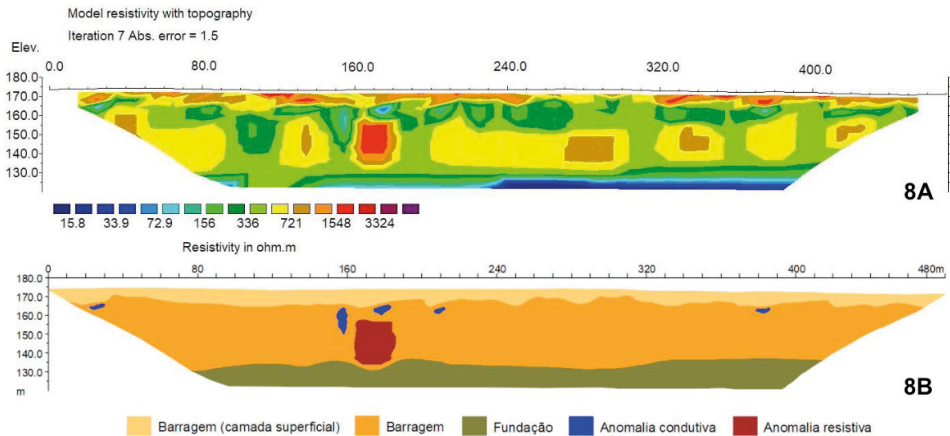


Figura 8. Seção de resistividade gerada para o perfil CP01 (8A). É possível que as anomalias condutivas, indicadas na figura (8B), se refiram a pontos com material mais argiloso ou com maior saturação de água. A anomalia resistiva, quando comparada com imagens de satélite públicas, se alinha com uma antiga seção da barragem, soterrada por rejeito após sucessivas etapas de alteamento.

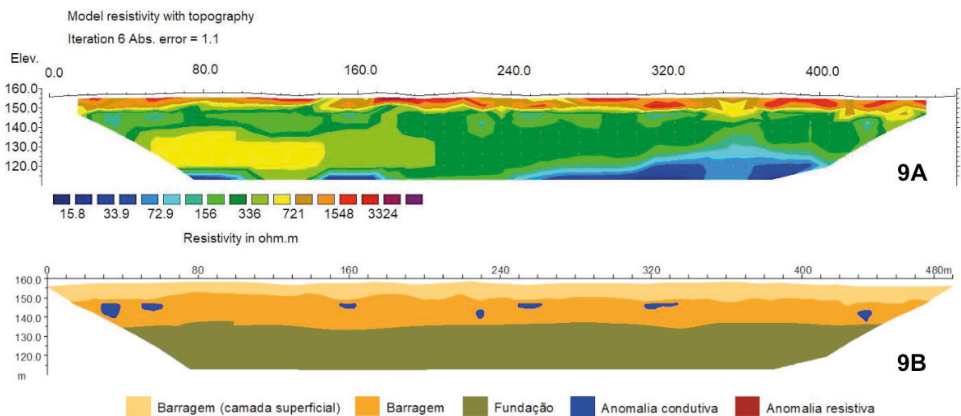


Figura 9. Seção de resistividade gerada para o perfil BP01 (9A). As anomalias condutivas, visualizadas na figura (9B), mais uma vez, podem estar associadas a pontos com material mais argiloso ou com saturação anômala de água. Na base do perfil, fica mais evidente a influência da fundação, caracterizada por materiais com resistividades mais baixas e pela possível influência do Rio Bento Gomes, que se localiza a cerca de 200 metros da barragem.

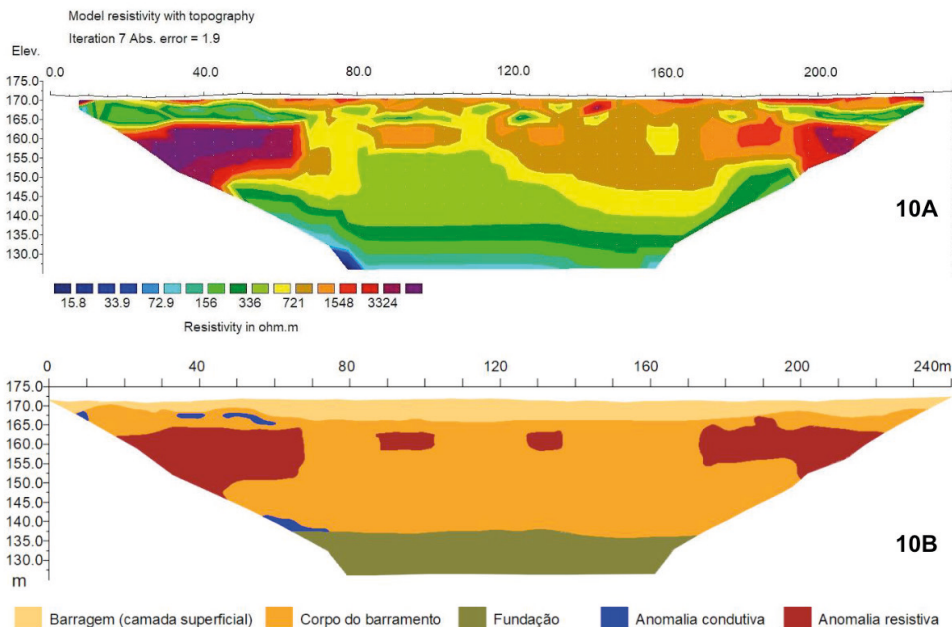


Figura 10. Seção de resistividade gerada para o perfil CA01 (10A). A exemplo de outras seções, as anomalias condutivas, visualizadas na figura (10B) podem ser referir a pontos com material mais argiloso ou saturação anormal de água. Vale menção a existência de grandes zonas com resistividade mais elevada que o restante do corpo da barragem na seção, o que pode ser resultado de emprego de materiais ou técnicas diferentes durante os sucessivos alteamentos nessa parte do barramento.

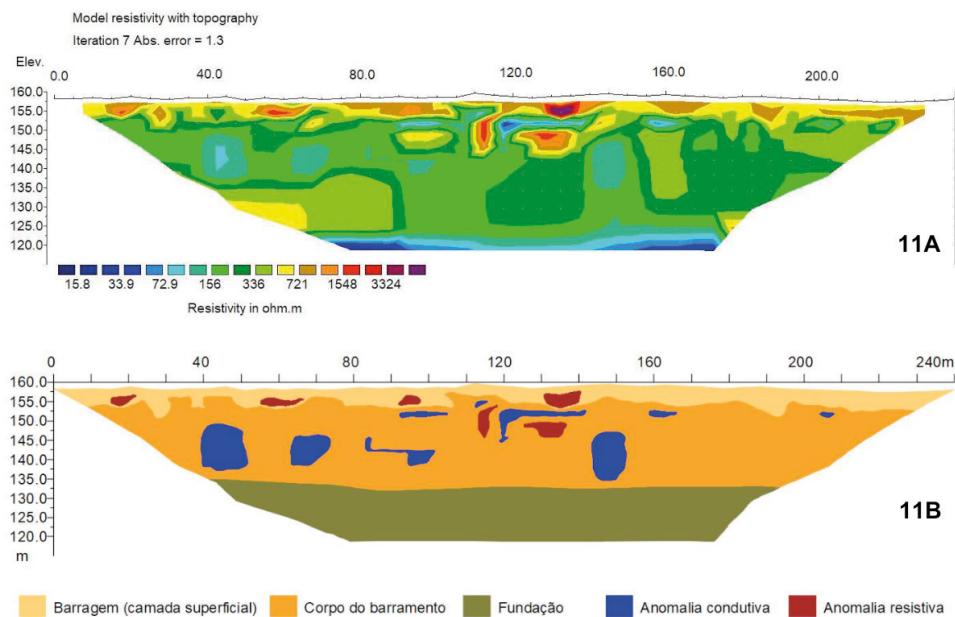


Figura 11. Seção de resistividade gerada para o perfil BA01 (11A). As anomalias condutivas, visualizadas na figura (11B) podem ser referir a pontos com material mais argiloso ou saturação anormal de água. As anomalias resistivas visualizadas, possivelmente, se referem a blocos de rocha presentes no material utilizado durante os sucessivos alteamentos nessa parte do barramento.

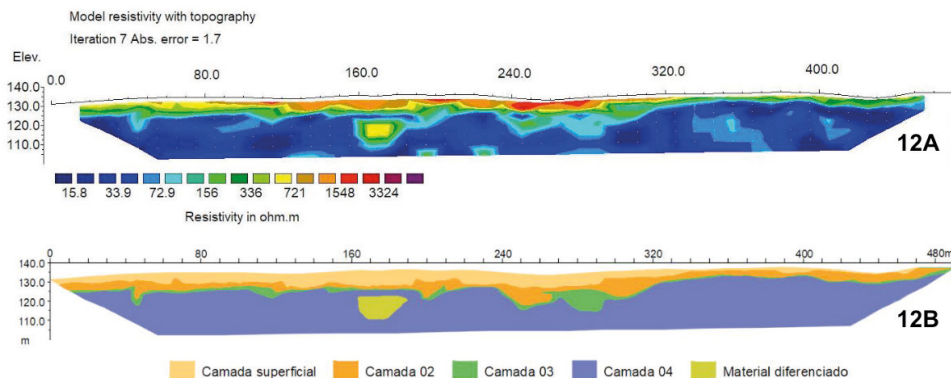


Figura 12. Seção de resistividade gerada perfil FP01 (12A). A barragem se encontra assentada sobre sedimentos. Este perfil foi construído para comparação entre a resistividade do corpo do barramento (construído) e a fundação (terreno natural). É possível identificar algumas camadas com resistividades diferentes, possivelmente associadas à coluna estratigráfica dos sedimentos, naquele local, ou mesmo a níveis de saturação de água no terreno. A anomalia, identificada como “material diferenciado” pode estar associada a presença de um bloco de rocha (matacão) naquela posição ou mesmo à presença de veios no local. Além disso, fica evidenciada a resistividade mais baixa do terreno natural, em comparação com a barragem. Essa condição pode estar associada à mineralogia dos sedimentos ou à influência do Rio Bento Gomes, que passa a cerca de 200 metros do perfil.

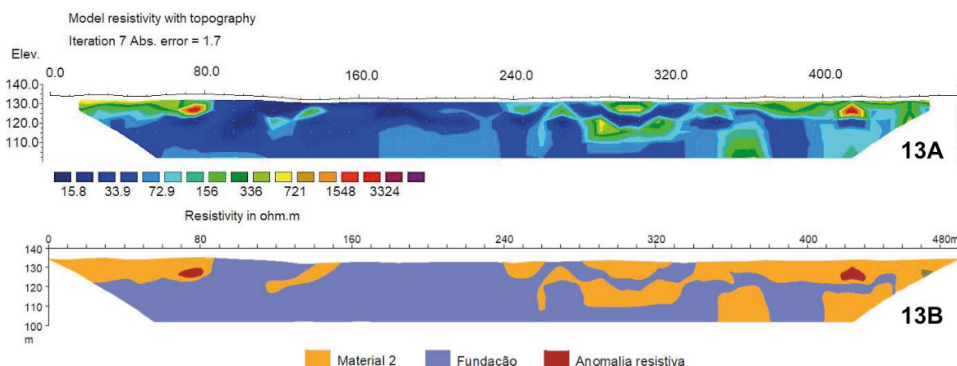


Figura 13. Seção de resistividade gerada perfil FA01 (13A). A barragem se encontra assentada sobre sedimentos. Este perfil foi construído para comparação entre a resistividade do corpo do barramento (construído) e a fundação (terreno natural). No perfil interpretativo (13B), não foi possível delimitar tão claramente as diferentes camadas de sedimentos presentes, tendo sido identificada a presença de materiais com maior resistividade (Material 2) junto com os sedimentos presentes na fundação. As anomalias resistivas, possivelmente, estão associadas com a presença de blocos de rocha (matacões) naquelas posições. Novamente, fica evidenciada a resistividade mais baixa do terreno natural, em comparação com a barragem. Essa condição pode estar associada à mineralogia dos sedimentos ou à influência do Rio Bento Gomes, que passa a cerca de 200 metros do perfil.

Nas seções de resistividade que se referem ao corpo da barragem, é possível identificar uma primeira camada com resistividade superior ao restante da estrutura. Isso, possivelmente, se deve ao fato de que o barramento passa por alteamentos contínuos, fazendo com que sempre haja uma camada de material menos saturado e com menos compactação, nos primeiros metros abaixo da crista e do piso da berma. Vale salientar que

a região onde se localiza a barragem se encontrava em um momento de baixa pluviosidade, em um período que compreende o final da estação seca.

O perfil CP01 se localiza na crista da parte mais antiga da barragem. Conforme as imagens de satélite públicas, esta parte passou por diversas modificações estruturais ao longo do tempo. Durante a etapa de interpretação das informações coletadas, foi verificada, por meio da seção, a existência de uma anomalia de grande resistividade no corpo do barramento. Ao comparar essa anomalia com as imagens de satélite históricas disponíveis, foi possível constatar que esta se alinha exatamente com uma antiga seção da barragem que foi soterrada pelos rejeitos depositados no reservatório ao longo dos anos e dos sucessivos alteamentos. Além disso, também foi constatada a existência de locais com resistividade muito. Tais anomalias de resistividade podem estar associadas a pontos com material mais argiloso, depositado durante os sucessivos alteamentos. Outra possibilidade é que essas anomalias de baixa resistividade estejam associadas a pontos onde exista uma maior saturação, provocada pela água que percola no corpo da barragem.

O perfil BP01 se localiza na berma da seção principal que foi construída para conferir maior estabilidade geotécnica à barragem, segundo as informações contidas nos respectivos projetos. Essa parte do barramento teve maior controle tecnológico e acompanhamento técnico durante sua construção. Na interpretação desse perfil, chama atenção os pontos com muito baixa resistividade. Os pontos com baixa resistividade, novamente, podem estar associados a locais com material mais argiloso ou mesmo com saturação elevada de água. Considerando a profundidade teórica de investigação, na base desse perfil, fica mais evidenciada a influência da fundação, caracterizada por materiais com resistividades mais baixas e pela possível influência do Rio Bento Gomes, que se localiza a cerca de 200 metros da barragem. Contudo, essa diferenciação só foi possível de determinar considerando a seção de resistividade do perfil FP01.

O perfil CA01 se localiza na crista da seção adjacente à seção principal da barragem, que, segundo informações históricas, foi construída para ampliar a capacidade do reservatório e melhorar o processo de sedimentação da fração sólida do rejeito. O ensaio geofísico nesse local teve como objetivo avaliar a percolação em mais uma seção do barramento, tendo em vista que este se constitui de um anel inteiramente construído. Assim como em outras partes da estrutura, também foram identificados pontos com baixa resistividade que podem estar associados à presença de material argiloso ou mesmo saturação anômala de água. Além disso, foi identificada a presença de grandes zonas com resistividade mais elevada, o que pode ser resultado de emprego de materiais ou técnicas construtivas diferentes durante os sucessivos alteamentos nessa parte do barramento.

O perfil BA01 se localiza na seção adjacente da berma de reforço da barragem. Trata-se da extensão da berma de reforço da barragem, que se inicia na seção principal. Novamente, foi identificada a presença de anomalias, possivelmente relacionadas à presença de material argiloso ou mesmo saturação de água anômala. Nesse caso, chama

atenção a quantidade de anomalias presentes no perfil, sugerindo uma intensificação no monitoramento dessa parte do barramento. As anomalias resistivas visualizadas, possivelmente, se referem a blocos de rocha presentes no material utilizado durante os sucessivos alteamentos nessa parte do barramento. Considerando a profundidade teórica de investigação e as informações da seção do perfil FA01, é possível visualizar a diferenciação das características do material da fundação e do barramento em relação à resistividade.

Os perfis FP01 e FA01 se localizam na base da seção principal e da seção lateral (adjacente) da barragem. O objetivo de sua construção e realização do ensaio geofísico nesses locais era compreender as resistividades no meio natural (fundação), no corpo da barragem e efetuar uma comparação entre essas partes, buscando identificar a diferenciação entre a fundação e o barramento construído. Na seção de resistividade do perfil FP01 é possível diferenciar algumas camadas pela variação das resistividades destas. É possível que as camadas identificadas estejam efetivamente, associadas à coluna estratigráfica dos sedimentos, naquele local, ou estar relacionadas mesmo a níveis de saturação de água no terreno em função da profundidade.

Na seção de resistividade do perfil FA01 não foi possível identificar com clareza a existência de uma coluna estratigráfica em função das resistividades medidas, a exemplo da seção do perfil FP01. Foi identificada a presença de materiais com resistividade maior que a encontrada no restante da seção. Contudo, é necessária a realização de investigações adicionais para compreender sua natureza e gênese. As anomalias resistivas, possivelmente, estão associadas com a presença de blocos de rocha (matacões) naquelas posições. Tanto na seção deste perfil quanto na seção do perfil FP01 chama atenção a baixa resistividade dos materiais. Tal condição pode estar associada à mineralogia dos sedimentos ou à influência do Rio Bento Gomes, que passa a cerca de 200 metros do perfil.

6 | CONCLUSÕES

Os sistemas tradicionais de monitoramento das barragens de mineração desempenham um papel fundamental na segurança destas. Esses sistemas são responsáveis pelo acompanhamento das condições operacionais dessas estruturas, permitindo a adoção de medidas preventivas ou corretivas em tempo hábil para que sejam evitados acidentes, que poderiam causar impactos às pessoas, ao meio ambiente e até mesmo à economia.

Contudo, os sistemas convencionais se baseiam, muitas vezes, em instrumentação distribuída de forma discreta, monitorando as condições de pontos e locais específicos do corpo desses barramentos. Além disso, apresentam limitações em alguns casos, como aqueles onde a barragem passa por alteamentos contínuos ou mesmo em situações onde há necessidade de que haja a mínima interferência possível, devido ao desconhecimento

das condições de estabilidade das estruturas ou mesmo devido à existência de condição de risco previamente identificada.

A geofísica já tem seu emprego consolidado na prospecção mineral. Além disso, também é usada com sucesso em outras áreas da geologia e da engenharia. A partir disso, novos estudos e o desenvolvimento de equipamentos mais modernos permitiram seu emprego também em situações cada vez mais abrangentes. Dentre essas, podemos citar a investigação e o monitoramento de barragens.

O trabalho apresentou resultados interessantes no emprego do método geofísico da eletrorresistividade para a investigação de uma barragem. Foram identificadas, por exemplo, anomalias de baixa resistividade em várias partes do corpo da estrutura. Estas, por sua vez podem estar associadas à simples presença de materiais com maior teor de argila, por exemplo, ou mesmo a locais onde possa estar sendo iniciado ou ocorrendo processos de formação de caminhos preferenciais de percolação anormal de água. Esse tipo de problema, quando existe e não é devidamente mitigado, pode evoluir para a instalação de um processo de *piping* na barragem. Assim, esses resultados fornecem uma orientação de locais para uma investigação mais detalhada ou mesmo para a elaboração e implantação de planos de monitoramento e instrumentação.

Além da investigação relacionada aos níveis freáticos no corpo da barragem, os resultados também indicaram a presença de pontos onde a resistividade de apresentava acima dos níveis do entorno. Nas seções de resistividade, esses locais são representados por anomalias de elevada resistividade. Ao correlacionar essas anomalias com o histórico de modificações promovidas no barramento, verificou-se que algumas delas se alinhavam com partes da barragem e diques internos que, durante os sucessivos alteamentos e modificações, acabaram por ser recobertos pelo rejeito depositado no reservatório. Esses resultados, inesperados durante a formulação do problema e realização do trabalho, abrem a possibilidade de que esse método geofísico possa ser usado como ferramenta para investigação das modificações estruturais pelas quais essas barragens passaram, ao longo de sua vida útil.

A motivação para realização deste trabalho foi verificar a aplicação do método a uma barragem construída no sistema de dique fechado, visto que outros trabalhos similares costumam focar em barragens construídas em sistema linear. Ao final, foi possível verificar que a metodologia empregada apresentou resultados bastante satisfatórios e até mesmo inesperados, que permitiram conhecer maiores detalhes a respeito da condição de saturação do corpo da barragem e até mesmo correlacionar alguns desses resultados com o histórico construtivo desta. Assim, fica evidenciado que as técnicas empregadas são eficazes tanto na investigação quanto no monitoramento deste tipo de barragem, podendo contribuir, inclusive, com as etapas que precedem sua construção. Considerando o escopo do trabalho de desenvolvido, não foi possível a realização dos ensaios em todos os taludes do barramento. Contudo, a realização dos levantamentos e até mesmo monitoramento

geofísico em todas as seções da barragem será capaz de fornecer informações bastante detalhadas e de forma mais continua a respeito da existência de condições que estão associadas a alguns dos principais problemas que podem ocorrer com esse tipo de estrutura. Além disso, a realização desse levantamento ou monitoramento de forma periódica, provavelmente, será capaz de identificar eventuais problemas em estágio inicial, permitindo a adoção de providências de forma antecipada e impedindo que esses evoluam para condições que possam comprometer a segurança estrutural da barragem.

REFERÊNCIAS

Almeida, F. F. M. (1964). Geologia do Centro-Oeste Mato-grossense. *Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia*, p.1-133.

Alvarenga, C. J. S. (1988). Turbiditos e a Glaciação do Final do Proterozóico Superior no Cinturão Paraguaí, Mato Grosso. *Revista Brasileira de Geociências*. 18(3), 323-327.

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. *NBR 13028/2013 – Mineração – Elaboração e Apresentação de Projeto de Barragens para Disposição de Rejeitos, Contenção de Sedimentos e Reservação de Água - Requisitos*. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

ANA – Agência Nacional de Águas. (2016). *Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens*. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/instrucoes-para-apresentacao-plano-seguranca-barragens>. Acesso em: 23 jun. 2023.

ANM – Agência Nacional de Mineração. (2019). *Relatório Anual de Segurança de Barragens de Mineração 2019*. Disponível em: < <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/relatorios-anuais-de-seguranca-da-barragens-de-mineracao-2/relatorio-anual-gsbm-2019-v-final.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

ANM - Agência Nacional de Mineração. (2022). *Resolução nº 95/2022*. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

Bento, G. R. (2017). *Fechamento de Barragens de Contenção de Rejeitos de Mineração*. Dissertação (Mestrado). Ouro Preto: Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP.

Braga, A. C. O. (2006). *Métodos Da Eletorresistividade e Polarização Induzida Aplicados nos Estudos da Captação e Contaminação de Águas Subterrâneas: Uma Abordagem Metodológica e Prática*. Tese (Livre Docência). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista – UNESP.

Bertuluci, F. B. (2020). *Análise das condições de percolação em barragem de terra a partir do método geofísico da eletorresistividade*. Dissertação (Mestrado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista – UNESP.

Bortolozo, C. A. (2016). *Inversão conjunta 1D e 2D de dados de eletorresistividade e TDEM aplicados em estudos de hidrogeologia na Bacia do Paraná*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo – USP.

- Calachibete, C. (2016). *Caracterização lito-geofísica por métodos geoeletricos na região da Baixada Cuibana – Trend Pirizal – Bento Gomes*. Dissertação (Mestrado). Brasília: Instituto de Geociências, Universidade de Brasília – UnB.
- Correa, J. A., Couto, E. A. (1972). *Projeto aluviões diamantíferos de Mato Grosso*. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/3782>>. Acesso em 23 de junho de 2023.
- Coura, M. M. (2019). *Aplicação de Métodos Geoeletricos para Análise da Estabilidade de Barragens de Terra*. Dissertação (Mestrado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista – UNESP.
- Dardenne, M. A. (1980). Relatório da viagem ao Mato Grosso. Goiânia. *Projeto Radam Brasil*, (Relatório Interno RADAMBRASIL, 377-G)
- Duarte, A. P. (2008). *Classificação das Barragens de Contenção de Rejeitos de Mineração e de Resíduos Industriais no Estado de Minas Gerais em Relação ao Potencial de Risco*. Dissertação (Mestrado). Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG.
- Espósito, T.J. (2000). *Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico*. Tese (Doutorado). Brasília: Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília – UnB.
- Gandolfo, O. C. B. (2007). *Um Estudo do Imageamento Geoeletrico na Investigação Rasa*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo – USP.
- Iakubovskii, I. U. V., Liajov, L. L. (1980). *Exploración eléctrica*. Espanha. Editorial Reverté, S.A.
- ICOLD - International Commission On Large Dams. (2001). *Bulletin 121: Tailings Dams Risk of Dangerous Occurrences: Lessons learnt from practical experiences*.
- Ladeira, J. E. R. (2007). *Avaliação de Segurança em Barragem de Terra, Sob O Cenário De Erosão Tubular Regressiva, por Métodos Probabilísticos: O caso UHE – São Simão*. Dissertação (Mestrado). Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG.
- Lima, C. S., Lima, T. E., Souza, C. A., Silva, J. L. (2017). A. Caracterização ambiental: geologia, geomorfologia e solo no baixo curso na bacia do Rio Cabaçal em Curvelândia Mato Grosso. I Congresso Nacional de Geografia Física. Campinas: Disponível em: <<https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i12017.1818>>. Acesso em: 23 jun. 2023.
- Luz, J. S. Oliveira, A. M. Souza, J. O. Motta, J. F. M. Tanno, L. C. Carmo, L. S. Souza, N. B. (1980). *Projeto Coxipó. Relatório Final*. Goiânia: DNPM/CPRM.
- Marangon, M. (2004). *Notas de aula: Barragens de Terra e Enrocamento*. Juiz de Fora: Núcleo de Geotecnia, Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF. Disponível em: <<https://www.ufjf.br/nugeo/files/2017/07/MARANGON-OT-05-Barragens-de-Terra-e-Enrocamento-2018-1.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2023.
- Miranda, J. G. (1997). *A produção de Ouro no Estado de Mato Grosso*. (1997). Dissertação (Mestrado). Campinas: Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.

Morgado, R. G. P. (2022). *Estudo das Causas de Rupturas de Barragens de Rejeito de Mineração no Brasil e Proposta para Avaliação da Operação*. Dissertação (Mestrado). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP.

Morgenstern, N. R., Vick, S. G., Viotti, C. B., Watts, B. D. (2016). *Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão*. Disponível em: <<https://www.fundacaorenova.org/wp-content/uploads/2017/10/relatorio-sobre-as-causas-imediatas-da-ruptura-da-barragem-de-fundao.pdf>> Acesso em: 23 jun. 2023.

Oliveira, W. K., Rohlf, D. B. K. Garcia, L. P. (2019). *O Desastre de Brumadinho e a Atuação da Vigilância em Saúde. Epidemiologia e Serviços de Saúde*. Disponível em: <<https://doi.org/10.5123/S1679-49742019000100025>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

Orellana, E. (1972). *Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua*. Madrid, Ed. Paraninfo.

Paula, M. C. L. (2019). *Estudo de Radarfacies em Placeres Auríferos na Baixada Cuiabana*. Instituto de Geociências. Dissertação (Mestrado). Brasília: Instituto de Geociências, Universidade de Brasília – UnB.

Pereira, T. S. (2013). *Avaliação do Desempenho de Diferentes Métodos de Análise de Estabilidade de Taludes em Barragens de Terra*. Dissertação (Mestrado). Santa Maria: Centro de Ciências Rurais. Universidade Federal de Santa Maria – UFSM.

Rangel, R. C. (2018). *Inversão Conjunta 2D de Dados de Caminhamento Elétrico e Caminhamento TDEM Aplicados a Estudos Hidrogeológicos em Taubaté/SP*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo – USP.

Souza, C. A., Lani, J. L., Sousa, J. B. (2006). Origem e Evolução do Pantanal Matogrossense. Goiânia. *VI Simpósio Nacional de Geomorfologia*. União da Geomorfologia Brasileira. Disponível em: <<http://lsie.unb.br/ugb/sinageo/6/3/132.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

Silva C. H.; Simões L. S. A.; Ruiz A.S. (2002). Caracterização Estrutural dos Veios Auríferos da Região de Cuiabá, MT. *Revista Brasileira de Geociências*, 32(4), 407-418.

Silveira, E. R. (2021). *Investigação Geofísica Elétrica Aplicada ao Monitoramento de Barragens de Prevenção de Acidentes*. Trabalho de Conclusão de Curso. Ouro Preto: Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP.

Souza, L. A. P., Gandolfo, O. C. B. (2021). *Geofísica Aplicada à Geologia de Engenharia e Meio Ambiente*. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental.

Tokashiki, C. C., Saes, G. S. (2008). Revisão Estratigráfica e Faciológica do Grupo Cuiabá no alinhamento Cangas-Poconé, Baixada Cuiabana, Mato Grosso. *Revista Brasileira de Geociências*, 38(4), 661-675.

DIAGNÓSTICO VISUAL DE EROSÃO NA ÁREA DO CÂMPUS UNIVERSITÁRIO DA UFMT EM VÁRZEA GRANDE - MT

Data de submissão: 07/11/2024

Data de aceite: 02/12/2024

Diandra Deyse Rodrigues Arraes

Universidade Federal de Mato Grosso,
Várzea Grande, Brasil

Gabriel Lauretti de Oliveira

Universidade Federal de Mato Grosso,
Várzea Grande, Brasil

Fabiani Maria Dalla Rosa Barbosa

Universidade Federal de Mato Grosso,
Várzea Grande, Brasil

RESUMO: Realizar estudos sobre erosões em áreas urbanas podem demandar altos custos financeiros, visto que, é exigido que faça deslocamentos no local e nas suas redondezas do processo de erosão. Os avanços tecnológicos na geotecnia tem contribuído nos custos em pesquisas e através das imagens disponibilizadas de ótima resolução favorece o planejamento em obter recursos que possam facilitar pesquisas para recuperação do solo. O objetivo desse artigo foi identificar através de imagens os processos de erosão na Universidade Federal de Mato Grosso, Campus de Várzea Grande, e categorizá-los. Para a metodologia, foi utilizada inspeção visual de imagens retirados pelos

autores e através do Google Earth Pro com controle de escala. Por meio das análises concluiu que no local havia solos que estavam sofrendo processo de erosão do tipo laminar, voçoroca e ravina, destacando que essas características se apresentavam com mais evidência próxima da cerca, dentro do Campus.

PALAVRAS-CHAVE: Erosão Urbana, Inspeção Visual, Voçoroca.

ABSTRACT: Conducting studies on erosion in urban areas can demand high financial costs, since it is required to make displacements in and around the site of the erosion process. Technological advances in geotechnics have contributed to the costs of research and, through the availability of high-resolution images, planning is favorable to obtain resources that can facilitate research for soil recovery. The objective of this paper was to identify through images the erosion processes at the Universidade Federal de Mato Grosso, Várzea Grande Campus, and to categorize them. For the methodology, visual inspection of images taken by the authors and through Google Earth Pro with scale control was used. Through the analysis, the authors concluded that the site had soils that were suffering from laminar,

gully and ravine erosion, highlighting that these characteristics were more evident near the fence, inside the campus.

KEYWORDS: Urban Erosion, Visual Inspection, Voçoroca.

1 | INTRODUÇÃO

O meio ambiente desempenha um papel central em nossa existência e bem-estar, sendo a fonte de recursos naturais essenciais para a vida humana, como água limpa, alimentos saudáveis e ar respirável. Além disso, abriga uma incrível diversidade de ecossistemas e espécies que contribuem para a estabilidade ecológica do planeta. A preservação do meio ambiente não apenas garante a sobrevivência das gerações futuras, mas também está intrinsecamente ligada à saúde e ao equilíbrio de todos os seres vivos que compartilham este mundo conosco. Portanto, é imperativo que adotemos práticas sustentáveis e promovamos a conscientização sobre a importância da conservação ambiental.

A construção de infraestruturas, como estradas, pontes, edifícios e sistemas de transporte, desempenha um papel crucial no desenvolvimento socioeconômico de uma região, Estado ou País. No entanto, a forma de como essas infraestruturas são por vezes planejadas, construídas e gerenciadas pode ter um impacto negativo ao meio ambiente. Práticas inadequadas de construção podem resultar em desmatamento desnecessário, degradação do solo e até mesmo a poluição da água e do ar.

O Câmpus Universitário de Várzea Grande - UFMT está atualmente em processo de implantação, ou seja, em construção. Parte de seu perímetro foi cercado com alambrado. No entanto, surgiu uma preocupação em um dos pontos da cerca, próximo à via de acesso principal, onde o solo na base do pilar da cerca está erodindo.

Avaliar a erosão do solo na base da cerca, permitirá tomar decisões técnica e ambientalmente eficazes. O diagnóstico visual de erosão é uma técnica utilizada para identificar a presença e extensão de processos erosivos em uma determinada área. É uma abordagem simples e inicial que permite avaliar os sinais visíveis de erosão e fornecer uma análise preliminar do problema.

Desta forma, faz-se necessário entender as possíveis causas da erosão e agregar informações, a fim de propor soluções que possam minimizar os riscos sobre as obras já instauradas e aquelas que futuramente serão construídas.

O objetivo do trabalho consiste em identificar e classificar as erosões próximas da via de acesso ao Câmpus da UFMT em Várzea Grande e os fatores contribuintes para tal evento, por meio de inspeção visual. Além de pontuar fatores contribuintes ou agravantes para o evento, considerar se há condições de crescimento das erosões presentes e verificar possíveis soluções a serem implementadas para mitigar o problema.

2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Teixeira et al. (2009), as rochas expostas ao intemperismo podem ser erodidas, transportadas e depositadas, constituindo as rochas sedimentares. O intemperismo consiste na ação da atmosfera, hidrosfera e biosfera, um processo natural que envolve oxidação, hidratação, solubilização, ataques por substâncias orgânicas, variações diárias e sazonais de temperatura e precipitação pluviométrica.

Os processos de formação de rochas sedimentares atuam sobre todos os tipos de rochas (ígneas, metamórficas e sedimentares). De modo análogo, qualquer rocha que sofra ação de altas pressões e temperatura passa por transformações mineralógicas e texturais, tornando-se uma rocha metamórfica (Teixeira et al., 2009).

As rochas ígneas, por sua vez, são formadas no resfriamento do magma, podendo ser plutônica ou intrusiva, subvulcânica ou extrusiva rasa (Carneiro et al., 2019).

A partir das rochas e do processo de intemperismo formam-se diferentes tipos de solos.

O solo é um material tridimensional, advindo da rocha matriz subjacente ou formado por elementos provindos de outras regiões, movidos pelos agentes água, vento e gelo, (Silva et al., 2003).

O processo erosivo pode ser de forma natural ou de forma acelerada pelo processo de antropização, que depende da interferência do homem. Esta é mais complexa por, na sua maioria, deteriorar numa velocidade maior que a reposição de um novo solo (M. S. L. da Silva, 1995).

É importante conhecer os tipos de agentes responsáveis pelas erosões comumente encontradas. De acordo com M. S. L. da Silva (1995), os agentes responsáveis pelas erosões são a água, sendo o mais impactante, vento, temperatura e ação biológica. A erosão causada pela água pode ocorrer em diferentes escalas, desde pequenas partículas de solo sendo levadas pela chuva até grandes deslocamentos com a ajuda dos agentes naturais. Essas formas ou classes de erosão hídrica ocorrem na forma laminar ou linear, sendo:

1. Laminares: ocorre por meio da ação da água da chuva em contato com o solo e pelo escoamento superficial, uma camada fina é retirada, de modo praticamente uniforme (A. M. Silva et al., 2003).

2. Lineares: essas erosões são uma evolução das laminares, resultante das suas repetidas ações, divididas em sulco, ravina, voçoroca e *piping*. Cada uma delas estão descritas a seguir:

a. Sulco: o sulco é uma evolução da erosão laminar. Quanto maior a concentração do fluxo sobre o solo, maior será a erosão e formação desses sulcos.

b. Ravina: quando esse fluxo causador dos sulcos continua com a mesma concentração ou até mesmo tenha sua intensidade aumentada, sucede as

ravinas, ou seja, a profundidade dos sulcos ultrapassará 10 centímetro (M. S. L. da Silva, 1995).

c. Voçoroca: ela ocorre nos últimos níveis do processo de erosão, ou melhor, quando as ravinas não recebem a tempo um tratamento adequado a fim de reverter a situação, chega até a zona saturada do subsolo (Sales et al., 2017).

d. Piping: é uma erosão interna em nível subterrâneo que se origina na retirada de partículas no interior do solo por meio da percolação da água, formando tubos dentro do próprio solo (Camapum de Carvalho et al., 2006)

Há vários fatores que favorecem o processo de erosão. O clima que impacta diretamente na intensidade, duração e distribuição das chuvas; a vegetação, sendo responsável pela interceptação, retenção da chuva e aumento da resistência ao escoamento superficial; a natureza do solo é um dos fatores que influencia na porção transportado pela erosão; e a topografia sendo fator decisivo no processo erosivo dependendo por exemplo da declividade da área (Oliveira & Monticeli, 2018).

3 | METODOLOGIA

Utilizou-se como método principal a inspeção visual. Adicionou-se imagens de satélite retiradas do *software* Google Earth, imagens fotográficas do local, com o objetivo de proporcionar uma avaliação ao longo do tempo na área em estudo. Usou-se também o equipamento de GPS (*Global Positioning System*) para georreferenciamento.

3.1 Local de estudo

O local onde está situado dentro do Câmpus da UFMT e possui as coordenadas geográficas de latitude $-15^{\circ}34'52.7''\text{S}$ e longitude $-56^{\circ}1145.8''\text{W}$, na Cidade de Várzea Grande, Estado de Mato Grosso.

Realizou-se duas visitas a campo, uma sendo no dia 24 de setembro de 2022, e a outra dia 19 de novembro de 2022. A partir das coordenadas geográficas, buscou-se imagens satelitais desde 2009, quando a área estava toda coberta por vegetação, Figura 1. Depois, de 2014, quando iniciou a construção do Câmpus, Figura 2, e em 2017, Figura 3 e as Figuras 4 e 5, imagens de 2022 e 2023 respectivamente, com a via de acesso ao Câmpus e ao Parque Tecnológico do Estado de Mato Grosso após a pavimentação.

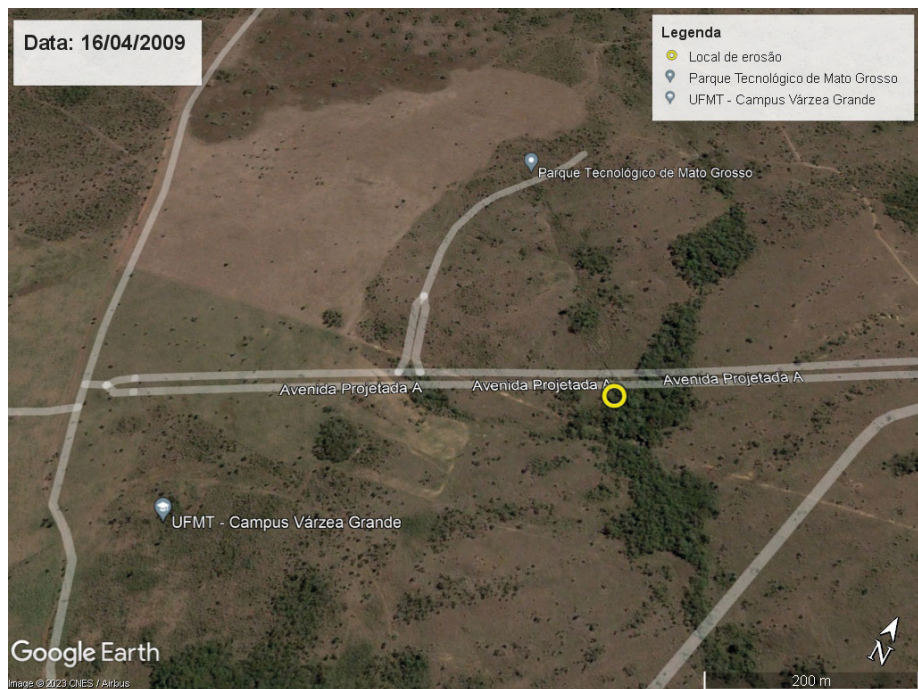


Figura 1 – Imagem do local de estudo no ano de 2009.

Fonte: Imagem do satélite CNES / Airbus, 2009. Google Earth, 2023.

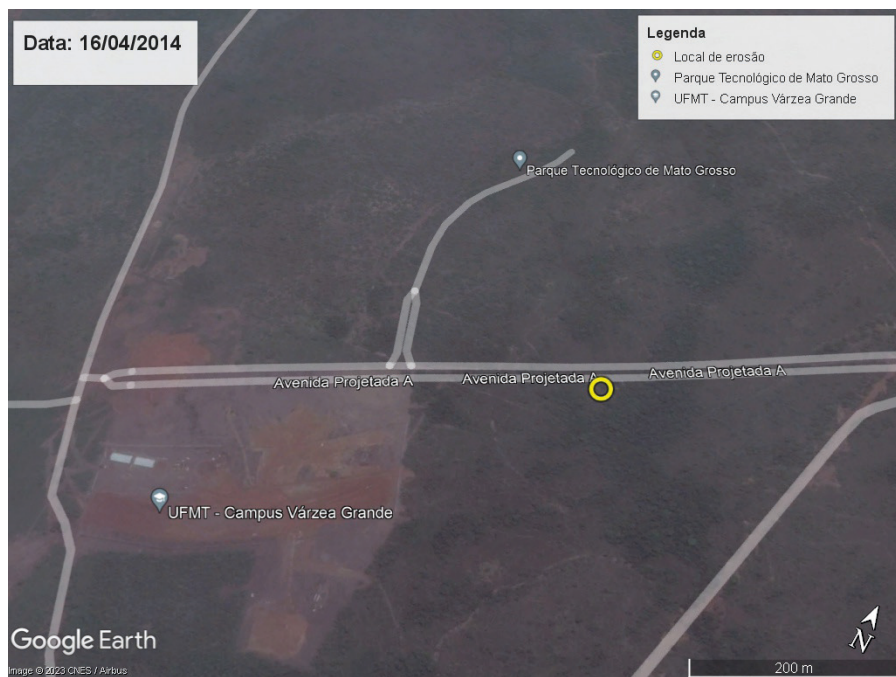


Figura 2 – Imagem do local de estudo no ano de 2014.

Fonte: Imagem do satélite CNES / Airbus, 2014. Google Earth, 2023.



Figura 3 – Imagem do local de estudo no ano de 2017.

Fonte: Imagem do satélite CNES / Airbus, 2017. Google Earth, 2023.



Figura 4 – Imagem do local de estudo no ano de 2022.

Fonte: Imagem do satélite CNES / Airbus, 2022. Google Earth, 2023.

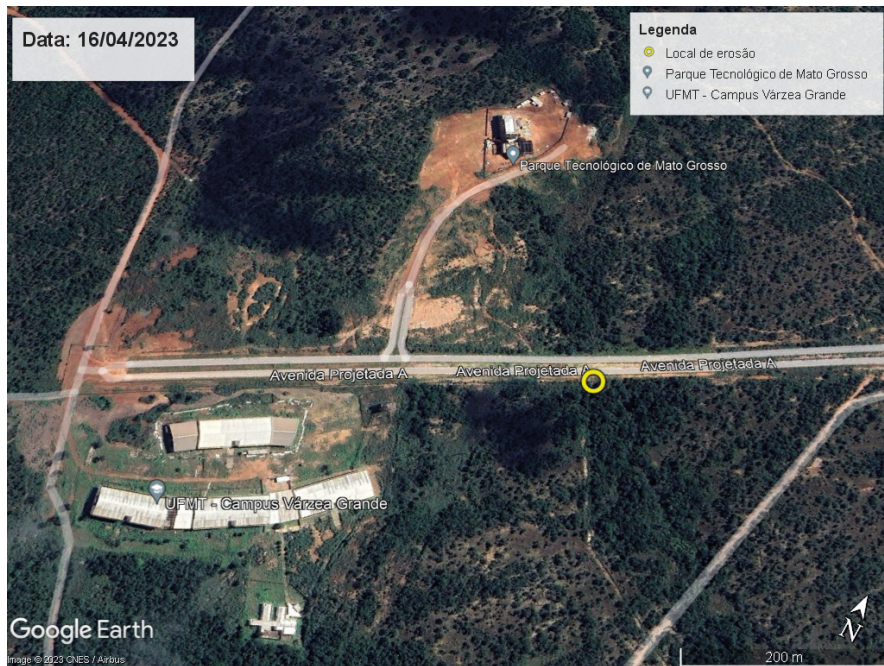


Figura 5 – Imagem do local de estudo no ano de 2023.

Fonte: Imagem do satélite CNES / Airbus, 2023. Google Earth, 2023.

3.2 Roteiro inspeção visual

Adotou-se o método de inspeção visual, o qual aponta as características gerais da erosão encontrada na área. Na Figura 6, apresenta-se o roteiro utilizado durante a inspeção visual.



Figura 6. Roteiro da inspeção visual.

Fonte: Autores, (2023)

Descreve-se as etapas citadas na Figura 6, sendo a primeira etapa composta por:

- Identificação de áreas afetadas: aterros, encostas, solo exposto, margem de rios, córregos, e corpos d'água.
- Registro fotográfico: documentação por fotos georreferenciadas e datadas.
- Avaliação de sinais de erosão: sulcos, ravinas, voçorocas, sedimentos acumulados, alterações no padrão de drenagem e inclinação de árvores, inclinação e posição de construções, sinais de deslizamento, movimentação do solo ou rachaduras.

Na segunda etapa, descreve-se as características, sendo compostas por:

- Características gerais:
 - a. existência de raízes profundas
 - b. existência de resíduos no entorno (despejos)
 - c. existência de formigueiros
 - d. existência de tráfego de animais
 - e. existência de cavas abertas por animais

- f. liberação de poluentes químicos constituídos por nutrientes vegetais e agrotóxicos
- g. deterioração das condições físicas para desenvolvimento da vegetação
- Características de proteção:
 - a. existência de assoreamento local
 - b. existência de produção de sedimentos
 - c. existência de desabamento
 - d. característica da água (turbidez)
 - e. condições da estrutura
 - f. características geológicas, geotécnicas, estruturais e hidráulicas dos estratos presentes
 - g. características do sistema de proteção
 - h. condições das canaletas de drenagem
 - i. proteção dos taludes
- Características estruturais:
 - a. formas de relevo e condições das encostas
 - b. posição relativa do nível d'água na superfície do talude
 - c. posição relativa do nível d'água subterrânea em relação ao talude
 - d. extensão da erosão: identificação a área afetada pela erosão obtida in situ ou por meio de imagens georreferenciadas
 - e. causas da erosão: identificar as possíveis causas da erosão: chuvas intensas, declividades acentuadas, falta de vegetação, sistema de drenagem
 - f. impactos ambientais: avaliar os impactos ambientais causados pela erosão, como a contaminação da água por sedimentos, assoreamento de corpos d'água e comprometimento da qualidade do solo. Isso ajudará a entender a magnitude dos efeitos e a necessidade de medidas de mitigação

A terceira etapa trata da identificação das causas, os impactos e a mitigação, realizada por meio da análise dos dados observados em campo e das advindas de imagens fotográfica e satelitais.

3.3 Características de proteção

Em relação a cerca e os locais próximo desta, foi possível observar quanto:

- a. existência de assoreamento local: não foram observados indícios de assoreamento no local.

- b. existência de produção de sedimentos: não foi observada essa ocorrência. As visitas ocorreram no período de seca.
- c. existência de desabamento: o encontro da cerca encontra-se suspensa, ou seja, o pilar principal na mudança de direção da cerca está sem apoio.
- d. característica do rip-rap quanto ao rompimento, deslocamento e manutenção: na região visita não havia rip-rap.
- e. condições do sumidouro: não possui sumidouro na região.
- f. característica da água (turbidez): não foi encontrado fluxo de água no local. Existem manilhas instaladas próximas a área de estudo sem apresentar vasão de água.
- g. condições da estrutura: trata de um cerca de alambrado. Na análise visual verificou-se o comprometimento da estrutura junto a erosão.

Características geológicas, geotécnicas, estruturais e hidráulicas dos estratos presentes: o solo da região faz parte da Baixada Cuiabana, geologicamente formada pelo grupo Cuiabá Subunidade 5, tendo como rocha matriz o filito, Ribeiro e Conciani (2005). De acordo com Luz *et al.* (2015), a área que compõem o Câmpus Várzea Grande, corresponde a uma superfície aplainada de inclinação inferior a 6% apresentando uma velocidade de escoamento baixa, resultando em uma moderada suscetibilidade à erosão. Apresentando uma constituição predominante de Plintossolo Pétrico, além de Neossolo Litólico, na camada superficial apresenta abundância de cascalho.

- h. características do sistema de proteção: a vegetação no entorno da cerca está preservada. Contudo, para construção da via de acesso que margeia a cerca foi necessário o desmatamento e a erosão encontra-se numa área sem proteção vegetal, com provável fluxo de água da drenagem da via.
- i. condições das canaletas de drenagem: estão conservadas, visto que a construção da via é recente (2021-2022). em se tratando das canaletas de drenagem, não foi observado o desgaste delas. Apenas onde encontra-se a jusante foi constatada pouco de cal com restos de construção.
- j. proteção dos taludes: poderia melhorar a vegetação em sua proteção contra a erosão, os demais estão satisfatórios.
- k. condições do filtro de pé: apesar de não ter sido observado, acredita-se que esteja funcionando de forma satisfatória.

3.4 Características estruturais

Em relação às características estruturais da área de estudo (não trata da estrutura da cerca, mas da estrutura da área), foi possível observar:

- a. *formas de relevo e condições das encostas*: o Câmpus de Várzea Grande está construído em uma área com topografia suave, possui uma cobertura vegetal de cerrado com pontos de Pantanal e Floresta Amazônica. A altitude varia de 150m a

210m. O relevo com declividade de 0% a 2% suave a plano, de 2% a 5% de suave a ondulado. (Plano Diretor VG, 2020).

b. *posição relativa do nível d'água na superfície do talude*: não existe nível d'água na superfície.

c. *posição relativa do nível d'água subterrânea em relação ao talude*: não foram realizados ensaios *in situ* para determinação do nível d'água subterrânea. Contudo, as sondagens à percussão executadas onde os prédios do Câmpus serão construídos não indicam nível d'água até a profundidade de 11 m, limite sondado, Pallú Arquitetura e Engenharia LTDA-ME (2013).

d. *existência de erosão superficial na crista do talude*: observou-se indícios de erosão nos taludes do aterro da pavimentação da via.

e. *existência de trincas transversais no maciço, trincas longitudinais nos taludes de montante e jusante, rachaduras por ressecamento na crista do maciço, erosão no "pé" da barragem provocado pela saída de água, deslizamento ou afundamento da estrutura de montante, deslizamento do talude abatimento da crista do talude, desalinhamento da crista do talude, predominância de área molhada no talude de jusante*: não trata de barragem. Observou-se que trata de uma área que por algum tempo antes de ser povoada, serviu para descarte de resíduos de obras de forma inadequada.

4 | RESULTADOS

De acordo com as inspeções realizadas, adicionadas das informações obtidas pelas imagens satelitais, e fotografias do local, descreve-se as seguintes características:

O local de estudo trata de uma área que recebeu aterro, despejos de materiais advindos de vários locais, inclusive, em alguns pontos possui tons acinzentados, presença de britas e raízes, levando a considerar que provavelmente sejam resíduos de construção conforme observado na Figura 7.



Figura 7 – Imagem da erosão no aterro.

Fonte: Autores, 2023.

Por meio da classificação tátil visual, o solo pode ser classificado como areno-argiloso, com a presença de fragmentos de filito. Tal classificação, está compatível com as informações do Mapa Geológico do Estado CPRM (2006). CPRM (2006), indica que na região há presença de terraços aluviais sub recentes, constituído por sedimentos arenosos semi-consolidados, de cor cinza-claro a amarelados, com intercalações de concreções limoníticas, filitos conglomeráticos com matriz areno-argilosa contendo clastos de quartzo, filito e quartzo, com intercalações subordinadas de metarenitos.

A erosão em questão apresentou as medidas de 7 metros no sentido longitudinal, 14 metros de largura e 2,40 de profundidade, conforme mostram as Figuras 8, 9 e 10.



Figura 8 – Imagem da erosão no aterro e abaixo cerca, explicitando a altura.

Fonte: Autores, 2023.



Figura 9 – Imagem da erosão do aterro, indicando o seu comprimento.

Fonte: Autores, 2023.



Figura 10 – Imagem da erosão do aterro e a indicação da largura.

Fonte: Autores, 2023.

A erosão, deixou parte da cerca do Câmpus suspensa. Tal situação pode provocar desabamentos parciais, Figura 11.



Figura 11 – Imagem da erosão no aterro mais a cerca suspensa.

Fonte: Autores, 2023.

Na Figura 12, observa-se a erosão, parte da cerca suspensa e ao terço da estrutura do pavimento da via de acesso ao Câmpus.



Figura 12 – Imagem da erosão no aterro e a cerca suspensa com vista do pavimento da avenida de acesso ao Campus.

Fonte: Autores, 2023.

Foram efetuadas duas visitas técnicas ao local da erosão, a primeira no dia 24 de setembro de 2022 e a segunda visita em 19 de novembro de 2022, com fim de verificar se haveria um aumento nas áreas erodidas.

No entanto não foi constatado um aumento significativo, porém não houve a ocorrência de chuvas intensas entre o período de intervalo entre as duas visitas.



Figura 13 – Imagem da erosão com todas as vistas.

Fonte: Autores, 2023.

Existem métodos preventivos de erosão ao longo do aterro, aglomerados de pedregulhos acimentados e vegetação nas superfícies laterais do aterro, porém no local da erosão não há nenhum dos dois métodos, conforme é mostrado na imagem.

5 | CONCLUSÃO

Após as visitas ao local e analisada as imagens, constatou-se erosões dos tipos laminares e lineares, sendo estas do tipo sulco e ravinas. Observa-se desnível entre o aterro da estrutura do pavimento e a fundação do pilar da cerca.

O processo de erosão, possivelmente é oriundo das águas provenientes das chuvas. Além da erosão próxima a estrutura da cerca, existe outra erosão numa distância aproximada de 5 m a jusante da erosão analisada.

De acordo com a inspeção visual realizada no local em estudo, verificou que a declividade existente advém da topografia natural, no entanto há aterro sobreposto, a fim de realizar a implementação da via.

Não foi observado sistema de drenagem adequado, com descidas d'água junto à via pavimentada. Tais obras poderiam canalizar e direcionar para um exultório adequado as águas advindas das chuvas.

Ademais, foi encontrado um pequeno exultório de superfície formada por aparentemente matacões, utilizado, supostamente, como método preventivo de erosões. No entanto, devido a quantidade de erosões encontradas naquela área, indica-se a necessidade de realizar estudos técnicos mais rigorosos e projetar um sistema de drenagem adequado.

Observou-se que a erosão pode comprometer a estabilidade e a durabilidade da estrutura do pavimento,

Priorizar a proteção do ambiente natural ao redor do Campus não apenas preserva a biodiversidade local, mas também assegura que o espaço acadêmico esteja alinhado com os princípios da sustentabilidade, demonstrando um compromisso com a conservação do meio ambiente para as atuais e futuras gerações.

6 | PROPOSTAS DE SOLUÇÕES

A análise preliminar permite a implementação de medidas adequadas de prevenção e controle. Considerando o processo atual da erosão, uma das soluções possíveis para o caso em estudo pode ser a regularização do terreno afetado pela erosão, e a instalação da cobertura vegetal, (ARAÚJO et al., 2016).

A cobertura contribuirá na infiltração da água no solo e ajudará na dissipação de velocidade da água no escoamento superficial, promovendo maior estabilidade no controle do processo erosivo.

Ademais, faz necessário desaguar a água coletada nas sarjetas da via de forma adequada. A água precisa ser canalizada e dissipada antes de atingir o terreno natural.

Com o intuito de prevenir e minimizar os impactos de erosões em obras de engenharia, sugere-se:

- Implementação de práticas de manejo de água adequadas, como sistemas de drenagem eficientes, canalização adequada e contenção de águas pluviais.
- Implementação de barreiras físicas, para controlar o fluxo de água e minimizar o arraste de sedimentos.
- Implantação de sistemas de controle de sedimentos, como bacias de contenção, trincheiras de sedimentação.
- Adoção de boas práticas de construção, como minimizar a exposição do solo, cobertura vegetal temporária.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, M. A., SANTOS, M. J. P. dos, Pinheiro, H. P., & Cruz, Z. V. (2016, November). **Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação - Pavimento Rígido (concreto) x Flexível (asfalto).** *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento*, 187–196.

Bertoni, J., & Neto, F. L. (2005). **CONSERVAÇÃO DO SOLO BERTONI E LOMBARDI NETO** (4th ed.). iconc.

Camapum de Carvalho, J., Sales, M. M., Souza, N. M., & Melo, M. T. da S. (2006). **Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro** (FINATEC, Ed.).

Carneiro, A. P., Burgos, P. C., & Alberte, E. P. V. (n.d.). **USO DO AGREGADO RECICLADO EM CAMADAS DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS.**

Oliveira, A. M. dos S., & Monticeli, J. J. (2018). **Geologia de Engenharia e Ambiental** (Vol. 2).

Sales, M. M., Carvalho, J. C. de, Mascarenha, M. M. dos A., Luz, M. P. da, Souza, N. M. de, & Angelim, R. R. (2017). **Erosão em Borda de Reservatório** (Vol. 3). Cir Gráfica e Editora Ltda.

Silva, A. M., Schulz, H. E., & Camargo, P. B. de. (2003). **Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas.** Rima Editora.

Silva, M. S. L. da. (1995). *Estudos da Erosão.*

Teixeira, W., Fairchild, T. R., Toledo, M. C. M. de, & Taioli, F. (2009). **Decifrando a Terra** (2nd ed.). Companhia Editora Nacional.

BRITO, A. O. (2012). **Estudos da erosão no ambiente urbano, visando planejamento e controle ambiental no Distrito Federal.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal. Publicação PPG EFL. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 77.

PAULO J. R. ALBUQUERQUE. **Mecânica dos Solos.** Disponível em: <https://www.fecfau.unicamp.br/~pjra/mecanica-dos-solos/>. Acesso em: 17 out. 2022.

Grande, Varzea. Plano Diretor. <http://www.varzeagrande.mt.gov.br/plano-diretor/contextualizacao>. Acesso em: 17 dez. 2022.

Wilkson Flaviano da Silva; Milton Gonçalves da Silva Júnior; Fernando Ernesto Ucker; Ressiliane Prata Alonso; Alline Caitano Luz. **USO DE TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO DE ÁREA DEGRADADA POR PROCESSO EROSIVO EM ÁREA URBANA NO JARDIM MONT SERRAT NO MUNICÍPIO DE APARECIDA DE GOIÂNIA-GO.**

CONSTITUYENTES QUÍMICOS DE LA CASSAVA, SU CONTENIDO DE CIANURO Y DETOXIFICACIÓN DE ESTE

Data de submissão: 28/10/2024

Data de aceite: 02/12/2024

A.L. Paredes-Doig

Facultad de Ciencias, Universidad
Nacional de Ingeniería
Lima, Perú.

E. Doig-Camino

Departamento de Ciencias, Pontificia
Universidad Católica del Perú
San Miguel, Lima, Perú.

A. La Rosa-Toro

Facultad de Ciencias, Universidad
Nacional de Ingeniería
Lima, Perú.

RESUMEN: Se ha descrito las propiedades y características fundamentales de la Cassava, tanto como su composición química como sus sustancias bioactivas constituyentes como son los glucósidos cianogénicos que poseen. Estos al estar en contacto con la enzima linamarasa producen cianuro de hidrógeno, el cual es tóxico para el ser humano y el medio ambiente. Es por ello, que se presentan en este capítulo los métodos más comunes de detoxificación con el fin de tener un alimento libre de cianuro que llega a millones de personas cada año en su dieta principal. Se observa que hay una mayor concentración

de cianuro en las hojas. Lo que es un resultado importante porque estas no tienen ningún valor monetario y usándolas para la minería artesanal como lixiviante del oro aumenta su precio.

PALABRAS CLAVE: Cassava o Yuca Peruana, Glucósidos cianogénicos, Cianuro, Detoxificación

ABSTRACT: The fundamental properties and characteristics of Cassava have been described, as well as its chemical composition and its constituent bioactive substances such as the cyanogenic glycosides that it possesses. These, when in contact with the enzyme linamarase, produce hydrogen cyanide, which is toxic to humans and the environment. Seeing a higher concentration of cyanide in the leaves. This is an important result because these have no monetary value and using them for artisanal mining as a gold leaching agent increases their price.

KEYWORDS: Cassava or Yuca, Cyanogenic glycosides, Cyanide, Detoxification

INTRODUCCIÓN

La Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) es un alimento que posee muchos fitoconstituyentes. Pertenece a la familia Euphorbiaceae, que tiene más de 7200 especies, y está formado principalmente por células secretoras llamadas laticíferas. Se estima que más de 250 millones de toneladas de raíces frescas se producen a nivel mundial cada año y llegan a significar el 32% de la producción total de raíces y tubérculos (Howeler et al., 2013; Scaria, S. S et al., 2024)

La raíz de la yuca se compone de corteza (peridermo), piel (corteza) y parénquima. El parénquima es aproximadamente el 85% del peso total (Wheatley y Chuzel, 1993). Del total de su composición, los porcentajes son los siguientes: entre 60 y 65 por ciento de humedad, entre 20 y 31 por ciento de carbohidratos, entre otros. Las raíces son ricas en calcio y vitamina C y contienen una cantidad nutricionalmente significativa de tiamina, riboflavina y ácido nicotínico. El almidón de yuca contiene un 70 por ciento de amilopectina y un 20 por ciento de amilosa. La raíz de la cassava no posee mucha proteína, sin embargo, esa proteína contiene aminoácidos esenciales como la metionina, cisteína y la cistina. (Charles et al., 2005).

Las hojas de yuca ofrecen más proteínas que las raíces (Chijindu y Boateng, 2008; Habib Alhassan, 2017)

CONTENIDO

I) Componentes Bioactivos de la Cassava

La cassava posee glucósidos, hidroxycumarinas, terpenoides, fenólicos, ácidos, flavonoides, carbohidratos, azúcares, esteroides, grasas, ácidos, taninos y vitaminas.

Glucósidos cianogénicos que se encuentran en los tubérculos incluyen la linamarina y loteaustralina (Bayoumi et al., 2010). Glucósidos flavonoides como rutina, apigenina, kaempferol, y nicotiflorina se encuentran en las hojas (Jampa et al., 2022; Prawat et al., 1995). Las hidroxycumarinas son cruciales para la supervivencia de las plantas porque las protegen de enfermedades, estrés oxidativo e inestabilidad hormonal (Bourgaud et al., 2006).

Las plantas son una fuente rica de sustancias bioactivas como terpenoides, flavonoides y ácidos fenólicos. Ellos poseen una variedad de cualidades medicinales, incluidas antibacterianas, antioxidante, analgésico, antipirético, antiartrítico y los antiinflamatorios (Bokanisereme et al., 2013).

Con respecto a sus condiciones de cultivo, la yuca necesita un poco de calor para cultivarse. El clima debe ser templado (temperaturas diurnas superiores a 20 °C de media) para lograr el máximo crecimiento y producción, así como para una óptima temperatura de las hojas de 25 a 35 °C para la fotosíntesis (EL-Sharkawy, 2003).

La yuca es la tercera fuente de carbohidratos alimentarios en los trópicos, después del arroz y maíz. También es el alimento básico de más de 500 millones de personas en los trópicos, muchas de las cuales son muy pobres (Katz y Weaver, 2003, FAO, 2007). También se ha establecido a través de investigación como uno de los cultivos de tubérculos más perecederos y con una alta pérdida poscosecha (Diasolua et al., 2003).

1997). Por ejemplo, de la yuca, se contiene la farinha, la cual es un alimento que se consume en gran cantidad en Brasil.

Las ventajas de esta es que posee componente de alimentos para animales, un ingrediente crudo para el procesamiento de alimentos, recubrimientos, fuente de bebidas alcohólicas de producción local y fabricación de etanol.

Según investigaciones, las hojas, tallos, y los extractos tienen efectos cicatrizantes, anticancerígenos e hipotensores.

Propiedades (Lehmane et al., 2023).

II) Los Glucósidos Cianogénicos y el cianuro en la cassava

La presencia de glucósidos cianogénicos en la yuca que, cuando se descomponen mediante una reacción enzimática, libera cianuro de hidrógeno, plantea una gran preocupación en la utilización de la yuca como alimento y como materia prima industrial.

El cianuro total en los productos de yuca existe en forma de CG (linamarina y loteaustralina), cianhidrina y ácido cianhídrico libre (HCN).

Hay más de 2650 especies de plantas que contienen glucósidos cianogénicos y además una enzima hidrolítica correspondiente (β -glucosidasa) Cuando la estructura celular se destruye o se ve alterada por un depredador, se descomponen estos glucósidos en un azúcar y un cianhidrina, los cuales derivan rápidamente en cianuro de hidrógeno y un aldehído o una cetona (Haque y Bradbury, 2002). Hay aproximadamente veinticinco (25) glucósidos cianogénicos conocidos con los principales glucósidos cianogénicos que se encuentran en las partes comestibles de las plantas: cassava, almendras, sorgo, mandioca, frutas de hueso y brotes de bambú (OMS, 1993).

El nivel máximo seguro de cianuro total en los alimentos es de 10 ppm.

El cianuro y los compuestos químicamente relacionados que se encuentran en la naturaleza se forman, excretan y degradan por cientos de especies de bacterias, algas, hongos, plantas e insectos (Knowles, 1976, US Fish and Servicio de Vida Silvestre, 1991). Como resultado, pueden aparecer niveles bajos de cianuro en aguas superficiales o subterráneas, que normalmente donde no se esperaría que existieran (Duffey, 1981).

El nivel de cianuro de la yuca varía entre 75 y 350 ppm, pero puede llegar hasta 1.000 ppm o más dependiendo de la variedad, la edad de la planta, las condiciones del suelo, la aplicación de fertilizantes, el clima y otros factores. Los estudios han demostrado que los niveles de glucósidos cianogénicos en las raíces de yuca son generalmente más

bajos que los de las hojas y los tallos. Se ha informado que las raíces de yuca contienen un contenido de cianuro de 10 a 500 mg/kg de materia seca y que las hojas contienen 53 a 1300 equivalentes de cianuro/kg de materia seca. Los cultivos de yuca se clasifican en “amargos” o “dulces” según el nivel de glucósido cianogénico (de ahí el cianuro de hidrógeno). Se han informado valores de 15 a 400 mg de cianuro de hidrógeno por kilogramo de peso fresco de raíces de yuca para las variedades amargas. Las variedades dulces de yuca (bajo contenido de cianuro) normalmente contienen aproximadamente entre 15 y 50 mg de cianuro de hidrógeno/kg de yuca fresca [Gomez et al., 1983; Aregheore et al., 1991, Siritunga et al., 2000]

El consumo de residuos de cianuro causa envenenamiento, como causa trastornos neurológicos, parálisis, respiración, hipotensión, taquicardia, dolor de cabeza, dolor de estómago, náuseas, diarrea, mareos, confusión mental y convulsiones [Bradbury et al, 2011; Siritunga, 2004; Kambale et al., 2017]. Además, el consumo continuo de cianuro en dosis bajas provoca efectos como bocio, retraso del crecimiento y enfermedades neurológicas [Indrastuti et al, 2018].

Varios estudios han informado que los métodos de procesamiento, como pelar, secar, moler, remojar, hervir o cocinar, remojar y fermentar, causan una reducción significativa de los glucósidos cianogénicos de los alimentos procesados.

En condiciones neutras, la acetonacianhidrina se descompone en acetona y cianuro de hidrógeno. Aunque los métodos de procesamiento pueden reducir la linamarina y el cianuro en los alimentos, los procesados inadecuadamente harían que los productos de yuca contengan cierta cantidad de linamarina residual y cianuro de hidrógeno. Esto resultaría en la toxicidad potencial de los productos de yuca. (Bokanga et al, 1994, Akintowa y Tunwase, 1992). La cianogénesis se inicia cuando se rompen las barreras físicas entre los sustratos y las enzimas que siguen al daño estructural celular (Poulton, 1990). La toxicidad potencial de la yuca está relacionada con la capacidad de todas las partes de la planta para liberar HCN de los glucósidos cianogénicos almacenados. Esta capacidad se conoce como cianogénesis

(Ermans et al., 1980, Nahrstedt, 1993).

Los cianógenos residuales, linamarina y acetonacianhidrina, son la fuente aparente de cianuro. Toxicidad para animales y humanos, cuando se convierte en cianuro dentro del cuerpo. Para un ser humano adulto, el consumo de 50 a 100 mg o 2 mmol de HCN en 24 horas puede bloquear completamente la respiración celular que conduce a la muerte (Rosling, 1994). El consumo de productos de yuca con altas concentraciones de cianógenos puede provocar enfermedades o incluso la muerte (Tylleskär et al., 1991).

III) Métodos de Detoxificación

Varios estudios han informado que los métodos de procesamiento, como pelar, secar, moler, remojar, hervir o cocinar, remojar y fermentar, causan una reducción significativa de los glucósidos cianogénicos de los alimentos procesados.

En condiciones neutras, la acetonacianhidrina se descompone en acetona y cianuro de hidrógeno. Aunque los métodos de procesamiento pueden reducir la linamarina y el cianuro en los alimentos, los procesados inadecuadamente harían que los productos de yuca contengan cierta cantidad de linamarina residual y cianuro de hidrógeno. Esto resultaría en la toxicidad potencial de los productos de yuca. (Bokanga et al, 1994, Akintowa y Tunwase, 1992). La cianogénesis se inicia cuando se rompen las barreras físicas entre los sustratos y las enzimas que siguen al daño estructural celular (Poulton, 1990). La toxicidad potencial de la yuca está relacionada con la capacidad de todas las partes de la planta para liberar HCN de los glucósidos cianogénicos almacenados. Esta capacidad se conoce como cianogénesis (Ermans et al., 1980, Nahrstedt, 1993).

Los cianógenos residuales, linamarina y acetonacianhidrina, son la fuente aparente de cianuro. Toxicidad para animales y humanos, cuando se convierte en cianuro dentro del cuerpo. Para un ser humano adulto, el consumo de 50 a 100 mg o 2 mmol de HCN en 24 horas puede bloquear completamente la respiración celular que conduce a la muerte (Rosling, 1994). El consumo de productos de yuca con altas concentraciones de cianógenos puede provocar enfermedades o incluso la muerte (Tylleskär et al., 1991).

Investigadores llevaron a cabo la desintoxicación del cianuro mediante el proceso térmico [Latif et al, 2019], la fermentación mediante la utilización de microbios [Cicek et al, 1998], enzimática [Latif et al, 2019] y el uso de equipos como ultrasonido [Latif et al, 2019].

Hay más cianuro presente en la cáscara que en la pulpa (Samson & Akomolafe, 2017).

Alrededor del 50% de los glucósidos cianogénicos de la raíz pueden ser eliminados pelando la raíz.

Para mejorar la superficie y permitir más contacto entre linamarina y linamarasa también como proceso de desintoxicación más rápido, se utiliza el rallado.

Mientras que rallar solo es insuficiente para la desintoxicación, se puede combinar con otras técnicas para acelerar el proceso de fermentación que reduce o evapora el HCN.

El método más sencillo de desintoxicación de las raíces de yuca que contienen 61% de agua en peso, es secarlas.

1. El secado

La eliminación de cianhidrina aumenta con el secado completo al sol. Una posible explicación sería que la deshidratación de las raíces y la pérdida de humedad provocan cambios de pH lo que afecta la estabilidad de la cianohidrina

Durante la alta temperatura al secarse, la carcasa de la muestra se endurece, impidiendo la descomposición del cianógeno.

2. La Fermentación

La ayuda de microorganismos. Estos microorganismos pueden dañar la pared celular, lo que provoca una disminución del cianuro.

La fermentación como método de procesamiento mejora principalmente las propiedades nutricionales a través de biosíntesis de vitaminas, aminoácidos esenciales y proteínas, mejorando la calidad de las proteínas y digestibilidad de la fibra, así como la mejora de la biodisponibilidad de micronutrientes y la degradación de factores antinutricionales (Achinewhu et al., 1998, Motarjemi, 2002). Fermentación de la yuca, ambas aeróbico y anaeróbico, favorece la hidrólisis de la linamarina en HCN. Aunque los detalles de los mecanismos involucrados no están claros (Vasconcelos et al., 1990), la fermentación suaviza la estructura célula de las raíces y favorece el contacto de las enzimas con su sustrato (Essers, 1995). En el caso del tipo de fermentación sumergida, este proceso se combina en gran medida con la lixiviación de cianógeno para desintoxicar las raíces de yuca (Westby y Choo, 1994).

Se ha informado del potencial cianogénico de la yuca después de la fermentación. Más del 50 % y anteriormente se había logrado una reducción del 35 % en los niveles de cianógeno en la producción de garri y harina de yuca fermentada respectivamente (Kemdirim et al., 1995). Iyayi y Dosel, (2000) y Enidiok et al., (2008) también han informado de hasta un 80 % y un 41 % de reducción en los niveles de cianuro respectivamente durante la fermentación. Otros investigadores también han informado diferentes niveles de disminución en el potencial de cianógeno después de la fermentación (Cardoso et al., 2005, Bradbury, 2004, Djoulde et al., 2007, Oyewole y Ogundele, 2001, Zvauya y Muzondo, 1995). Reducción del nivel de cianuro en todos los casos depende de los niveles iniciales de cianuro de la materia prima.

La fermentación por bacterias del ácido láctico es un método de procesamiento comúnmente utilizado en África.

La fermentación de raíces remojadas en agua es mucho más eficaz que la de raíces ralladas en términos de reducción de cianógeno. De hecho, más del 90% de los cianógenos totales se eliminaron después de 3 días de fermentación y aproximadamente un tercio de la linamarina inicial se encontró en el agua. El proceso de eliminación de cianógeno se puede mejorar aumentando los tiempos de remojo y fermentación y pelando y rallando las raíces de yuca entre las etapas de remojo y fermentación.

3. Entre otros métodos de detoxificación

El cianuro de la yuca se desintoxicó pulverizándolo durante 15 minutos y seguido de un proceso de ebullición durante 10-120 minutos [Bradbury et al, 2011]. Otros métodos de desintoxicación de cianuro son el tratamiento térmico, la asistencia enzimática, la asistencia de microorganismos del proceso de fermentación, el uso de productos químicos como el bicarbonato de sodio y herramientas como el ultrasonido [Latif et al, 2019].

A) Enzimático

El cianuro se puede desintoxicar utilizando la enzima. En la investigación realizada por [10], la desintoxicación se llevó a cabo utilizando celulasas, hemicelulasas, xilanasas y betaglucanasa.

B) Químico

La adición de bicarbonato de sodio. El bicarbonato de sodio dañó las células vegetales y facilitó el contacto entre las enzimas linamarina y linamarasa. El bicarbonato de sodio también aumentó el pH, lo que resultó en la descomposición espontánea de la cianhidrina acetona. Disminuyó el cianuro en un 93%.

C) Destilación al vapor

Por ejemplo, Meuser y Smolnick (1980) demostraron que la destilación al vapor de pulpa de yuca fresca daba como resultado la eliminación total del cianógeno para un volumen mínimo de destilado de 100 ml (que se supone normalizado a 1 kg). La destilación al vapor de la pulpa fermentada eliminó lentamente los cianógenos. Para un volumen de destilado de 100 ml, sólo se eliminó el 65% de los cianógenos. Se necesitó un volumen de destilado ≥ 550 ml para eliminar aproximadamente el 90 % de los cianógenos. La resistencia de la pulpa fermentada a la eliminación del cianógeno puede explicarse por la estabilidad de la cianhidrina a valores de pH bajos.

D) Últimas Técnicas de Detoxificación

Las industrias de procesamiento de alimentos están aumentando su productividad para satisfacer la demanda global, sin embargo, existen algunos problemas asociados con la calidad e higiene de los alimentos que limitan su progreso. La aplicación del plasma atmosférico no térmico tiene una aplicación importante en la esterilización de superficies en las industrias de procesamiento de alimentos, en el envasado de alimentos, la germinación de semillas, la alteración de las propiedades bioquímicas de los granos y la masa, la destrucción de patógenos.

El llamado plasma se considera una alternativa a otros tratamientos físicos y químicos con varios beneficios, como operar a baja temperatura y requerir menos recursos

como energía, solvente y agua junto con un impacto insignificante o nulo en el producto.

Los plasmas térmicos se operan a una presión muy alta y requieren una gran potencia para producirlo. Se caracteriza por el equilibrio térmico entre los electrones, iones y gases a una temperatura muy alta. Los plasmas no térmicos se producen a menor presión o temperatura atmosférica y relativamente a temperatura ambiente y requieren menos energía para generarlos [Moussa D et al, 2003].

En los últimos 20 años, se han demostrado varias técnicas para generar plasmas no térmicos, como radiofrecuencia (RF), descargas de corona (CD), descargas de barrera dieléctrica (DBD), descargas de arco deslizante (GAD), descargas de brillo uniforme atmosférico, pulverización de plasma, aguja de plasma y chorro de plasma a presión atmosférica (APPJ) [Stepczynska M, 2016]. Descontaminación con microplasmas a través de chorro de plasma, agujas de plasma, lápices de plasma, generador de plasma de microhaz y antorchas de plasma [Pankaj SK et al., 2017].

La interacción de los radicales libres con el sitio activo de las enzimas ha producido cambios estructurales en las enzimas y ha provocado un cambio profundo en la conformación de las enzimas, como podría ser la beta-glucosidasa que se encuentra en la cassava.

Recientemente, Pashkuleva et al. [Pashkuleva I et al, 2009] propusieron el uso de la tecnología de plasma no térmico en la modificación de la superficie del almidón mediante la introducción de oxígeno en forma de grupo hidroxilo, carboxilo y carbonilo con aumento de la hidrofiliidad. En particular, la modificación del almidón se lleva a cabo mediante dos mecanismos: reticulación y despolimerización.

El plasma incandescente puede inducir la polimerización por injerto de etileno en almidones de arroz y batata, y la homopolimerización en almidones de Cassava (yuca), maíz, maíz ceroso y patata [Thirumdas R. et al, 2017].

D. Combinación de varios métodos de procesamiento

Las raíces de yuca secadas al sol generalmente retienen alrededor del 25% al 33% del total de cianógenos.

Además, si las raíces de yuca se remojan antes de secarlas al sol, la eliminación de cianógeno es mayor (97,8% a 98,7%)

De manera similar, triturar y luego secar al sol las raíces de yuca hasta convertirlas en harina permitió una eliminación total de cianógeno del 96% al 99%. Que se obtiene después de secar al sol raíces enteras de yuca, retiene el 33% del cianógeno total. De hecho, triturar las raíces de yuca daña las células de la planta y, por tanto, pone la linamarasa directamente en contacto con la linamarina. Luego, el secado al sol reduce la cianhidrina y el cianuro libre a niveles bajos.

La linamarasa interactúa de manera más eficiente. A 60°C, hay pérdida de HCN del 94,6%, mientras que a 105°C se da una pérdida del 87,1%. Las raíces de yuca secas retienen cianógenos como resultado del aumento de temperaturas porque la linamarasa se

vuelve inactivo a temperaturas superiores a 55°C (Lambri et al., 2013). Una desintoxicación exitosa requiere de 5 a 6 días. Utilizando el proceso de destilación al vapor, Se aisló ácido cianhídrico de las muestras resultantes.

La yuca se puede rallar y pelar antes de la fermentación. Y secar al sol o en un horno a baja temperatura para producir

Un producto final libre de cianógeno (Oke, 1994).

CONCLUSIONES

La Cassava peruana de variedad amarga posee sustancias bioactivas, entre ellas se encuentran los Glucósidos Cianogénicos que al hidrolizarse producen HCN, el cual es venenoso y peligroso para el ser humano y el medio ambiente. Por esta razón se emplean método de detoxificación como los mostrados en el presente Capítulo.

Los desafíos recaen en su mayoría en las técnicas que se puedan implementar para la detoxificación de la Cassava en las zonas marginales, en las que este producto se consume en su mayoría. Es decir, que la población se capacite y logre procesar la cassava de tal manera de que extraiga el cianuro y se quede con el alimento sin riesgo de envenenarse. Además, es necesario mejorar la ciencia y tecnología de extracción de los glucósidos cianogénicos o del cianuro libre. Este cianuro se puede emplear en la minería ecológica, dándole un valor agregado a los residuos agrícolas como son las hojas de la Cassava.

REFERENCIAS

Achinewhu, S.C., Barber, L.I. and Ijeoma, I.O. (1998). Physicochemical properties and garification (gari yield) of selected cassava cultivars in River States, Nigeria. *Plant Food for Human Nutrition*, 52: 133 – 140

American Public Health Association. (1992). ALPHA Method 4500-CN Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater.

Aregheore E.M, Agunbiade OO (1991) “The toxic effects of cassava . For reducing toxicity and improving food safety. *Food Chem Toxi-col* 49: 690 -693.

Balasubramanian, B., Meyyazhagan, A., Gangwar, J., Jaison, J. P., Kurian, J. T., Pushparaj, K., Pappuswamy, M., Park, S., & Joseph, K. S. (2024). Cassava (*Manihot esculenta* Crantz)—A potential source of phytochemicals, food and nutrition—An updated review. *Efood*, 5(1), e127. <https://doi.org/10.1002/efd2.127>

Bayoumi, S. A. L., Rowan, M. G., Beeching, J. R., & Blagbrough, I. S. (2010). Constituents and secondary metabolite natural products in fresh and deteriorated cassava roots. *Phytochemistry*, 71(5–6), 598–604. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2009.10.012>

Bokanga, M., Ekanayake, I., Dixon, A., Porto, M. (1994). Genotype-environment interactions for Cyanogenic potential in cassava. *Acta Horticulturae*, 375: 131–139.

- Bokanisereme, Yusuf, U. F., & Okechukwu, P. N. (2013). Antiinflammatory, analgesic and anti - pyretic activity of cassava leaves extract Anti-inflammatory, analgesic and anti - pyretic activity of cassava leaves extract. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 6, 89.
- Bourgaud, F., Hehn, A., Larbat, R., Doerper, S., Gontier, E., Kellner, S., & Matern, U. (2006). Biosynthesis of coumarins in Plants: A major pathway still to be unravelled for cytochrome P450 enzymes. *Phytochemistry Reviews*, 5(2–3), 293–308. <https://doi.org/10.1007/s11101-006-9040-2>
- Bradbury J H, Cliff J, Denton I C 2011 Uptake of wetting method in Africa to reduce cyanide poisoning and konzo from cassava *Food Chem. Toxicol* 49 3 539–542
- Bradbury, M., Egan, S., Bradbury, J. (1999). Determination of all forms of cyanogens in cassava roots and cassava products using picrate paper kits. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79:593–601.
- Brinker, A. M., & Seigler, D. S. (1989). METHODS FOR THE DETECTION AND QUANTITATIVE DETERMINATION OF CYANIDE IN PLANT MATERIALS. *PHYTOCHEMICAL BULLETIN*, 24-31.
- Cardoso, A., Mirone, E., Ernest, M., Massza, F., Cliff, J., Haque, R., Bradbury, J. (2005). Modification of nutritional quality of cassava through plant nutrition. *Journal of Food Composition and Analysis*, 18: 451-461.
- Carreón, N. V., Hernández, M. S., & Rodríguez, E. E. (2011). DETERMINACIONES DE CIANURO TOTAL SOBRE MUESTRAS DE EFLUENTES DE UNA CÍA. MINERA. *UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO*.
- Cicek M, Esen A (1998) Structure and Expression of a Dhurrinase (β -Glucosidase) from Sorghum
- CRISON INSTRUMENTS. (2012). *Electrodo selectivo de cianuro. Manual del usuario*. (R. Principal, Ed.)
- De-la-pava, R., Gómez-García, M. C., & Albis, A. R. (2023). Gold recovery in aqueous medium by cassava peels (*Manihot esculenta*) modified with citric acid. *Revista EIA*, 1-20.
- Diasolua, D., Kuo Y., Lambein, F. (2003). Cassava cyanogens and free amino acids in raw and cooked leaves. *Food and Chemical Toxicology*, 41:1193–1197.
- Enidiok, S.E., Attah, L.E. and Otuechere, C.A. (2008). Evaluation of moisture, total cyanide and fiber contents of Garri produced from cassava (*Manihot utilissima*) varieties obtained from Awassa in Southern Ethiopia. *Pakistan Journal of Nutrition*, 7:625 – 629.
- EL-Sharkawy, M. A. (2003). Cassava biology and physiology. *Plant Molecular Biology*, 53(5), 621–641. <https://doi.org/10.1023/B:PLAN.0000019109.01740.c6>
- Ermans, M., Mbulamoko, M., Delange, F., Ahluwalia, R. (1980). Role of cassava in the etiology of endemic goitre and cretinism. Ottawa, Ontario, International Development Research Centre, 182
- Essers, A.J.A. (1995). Removal of cyanogens from cassava roots: studies on domestic sun-drying and solid substrate fermentation in rural Africa. Phd thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands.
- Fomunyan RT, Adegbola AA, Oke OL (1984) Hydrolysis of linamarin by intestinal bacteria. *Canadian Journal of Microbiology* 1530-3330.

Habib alhassan. Determination of cyanogenic glycosides in roots of cassava plant and some cassava products. Thesis, 2017.

HANNA instruments. (s.f.). Electrodo combinado de cianuro HI 4109 y HI 4009. Obtenido de https://www.google.com/url?Sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahukewia4afq8jifaxwhrzuchxp1bi0qfnoecbaqaq&url=https%3A%2F%2Fcdn.hannacolombia.com%2Fhannacdn%2Fsupport%2Fmanual%2F2020%2F10%2FHI_4109_Manual_Espanol.pdf&usg=aovvaw2l4oadhgps3y5-1Eeb7l4g&

Haque, M., Bradbury, J. (2002). Total cyanide determination of plants and foods using the picrate and acid hydrolysis methods. *Food Chemistry*, 77(1): 107-114.

Howeler, R., Lutaladio, N., & Thomas, G. (2013). Save and grow: Cassava: A guide to sustainable production intensification. Food and Agriculture Organization of the United States of America.

Indrastuti Y E, Estiasih T, Christanti R A, Pulungan M H, Zubaedah E, Harijono (2018) Microbial and some chemical constituent changes of high cyanide cassava during simulant spontaneous submerged and solid-state fermentation of "gadungan pohung" *Int. Food Res. J* 25 2: 487-98

Gomez G, Valdivieso M (1983) The effect of variety and plant age on cyanide content, chemical composition and quality of cassava roots. *Nutrition Reports International* 27: 857-865.

Gomez, g., cuesta, d. D., valdivieso, m., & kawano, k. (1980). Contenido de cianuro total y Libre en parénquima y cáscara de raíces de diez variedades promisorias de yuca. *Turrialba*, 361-365.

Iyayi, E.A. and Losel, D.M. (2000). Cyanide detoxification in cassava by-products by fungal solid state fermentation. *The Journal of Food Technology in Africa*, 5:48 – 51

Jampa, M., Sutthanut, K., Weerapreeyakul, N., Tukumme, W., Wattanathorn, J., & Muchimapura, S. (2022). Multiple bioactivities Of *Manihot esculenta* leaves: UV filter, anti-oxidation, anti-melanogenesis, collagen synthesis enhancement, and anti-adipogenesis. *Molecules*, 27(5), 1556. <https://doi.org/10.3390/molecules27051556>

Kambale K J, Ali E R, Sadiki N H, Kayembe K P, Mvumbi L G, Yandju D L, Boivin M J, Boss G R, Stadler D D, Lambert W E, Lasarev M R, Okitundu L A, Ngoyi D M, Banea J P, tshalakatumbay D D (2017) Lower sulfurtransferase detoxification rates of cyanide in konzo— A tropical spastic paralysis linked to cassava cyanogenic poisoning *Neurotoxicology* 59 256–62

Katz, S.H., Weaver, W.W. (2003). *Encyclopedia of Food and Culture*. New York: Schribner, New York, NY USA.

Kemdirim, O.C., Chukwu, O.A. and Achinewhu, S.C. (1995). Effect of traditional processing of cassava on the cyanide content of gari and cassava flour. *Plant food for Human Nutrition*, 48:335 – 339.

Knowles, C. (1976). 'Micro-organisms and Cyanide', *Biological Reviews*, (40):652-680

Koç, E., Ahlatcı, F., Celep, O., Yazıcı, E. Y., & Deveci, H. (2014). INTERFERENCE OF METALS WITH THE DETERMINATION OF FREE CYANIDE. *Hydromet B&PM Group*, 1027-1033.

Lambri, M., Fumi, M. D., Roda, A., & De Faveri, D. M. (2013). Improved processing methods to reduce the total cyanide content of cassava roots from Burundi, 12(19), 2685–2691.

Latif S, Zimmermann S, Barati Z, Müller J (2019) Detoxification of cassava leaves by thermal, sodium bicarbonate, enzymatic, and ultrasonic treatments J. Food Sci. 84 1986-1991

Lehmane, H., Kohonou, A. N., Tchogou, A. P., Ba, R., Dah Nouvlessounon, D., Didagbé, O., Sina, H., Senou, M., Adjahoun, A., & Baba-Moussa, L. (2023). Antioxidant, antiinflammatory, and anti-cancer properties of amygdalin extracted from three cassava varieties cultivated in Benin. *Molecules*, 28(11), 4548. <https://doi.org/10.3390/molecules28114548>

Meeussen, o. C., Keizer, M. G., & Lukassen, W. D. (1992). Determination of Total and Free Cyanide in Water After Distillation. *ANALYST*.

Moussa D, Brisset J-L: Disposal of spent tributylphosphate by gliding arc plasma. *J Hazard Mater* 2003, 102:189-200.

Nahrstedt, A. (1993). Cyanogenesis and food plants. In: van Beek, T.A., Breteler, H., eds. *Proceedings of the International Symposium on Phytochemistry and Agriculture*, 22–24 April 1992, Wageningen. Oxford, Oxford University Press, 107–129

Nava-Alonso, Elorza-Rodríguez, Uribe-Salas, & Pérez-Garibay. (2007). Análisis químico de cianuro en el proceso de cianuración: revisión de los principales métodos. *REVISTA DE METALURGIA*.

Ndubuisi, N. D. (2018). Cyanide in Cassava: A Review. *International Journal of Genomics and Data Mining*.

OMEGA. (1992). Operators Manual: Cyanide Ion Selective Electrodes. USA.

Oke, O. L. (1994). Eliminating cyanogens from cassava through processing: Technology and tradition. *Acta Horticulturae*, 375, 163–174. <https://doi.org/10.17660/actahortic.1994.375.14>

Pankaj SK, Keener KM: Cold plasma: background, applications and current trends. *Curr Opin Food Sci* 2017, 16:49-52.

Pashkuleva I, Marques AP, Vaz F, Reis RL: Surface modification of starch based biomaterials by oxygen plasma or UV-irradiation. *J Mater Sci: Mater Med* 2009, 21:21-

Poulton, J. (1990). Cyanogenesis in plants. *Plant Physiology*, (94): 401-405.

Rodríguez, E. T., Álvarez, Y. A., Espinosa, R. H., & ramosescalona, M. (2022). Determinación de cianuro en harina y almidón de yuca (*Manihot esculenta*) de la variedad censa 64-7329. *Revista Cubana de Química*, 462-476.

Rojas, i. M. (2023). Evaluación del cianuro total de hojas de yuca (*manihot esculenta*) y propuesta de métodos de eliminación en diferentes variedades de colombia2023.

Rosling, H. (1994). Measuring effects in humans of dietary cyanide exposure from cassava. *Acta Horticulturae*, 375: 271-284.

Samson, S. O., & Akomolafe, O. M. (2017). Fermentation: A means of treating and improving the nutrition content of cassava (*Manihot Esculenta* C.) Peels and reducing its cyanide content. *Genomics and Applied Biology*, 8(3), 17–25.

Scaria, S. S., Balasubramanian, B., Meyyazhagan, A., Gangwar, J., Jaison, J. P., Kurian, J. T., Pushparaj, K., Pappuswamy, M., Park, S., & Joseph, K. S. (2024). Cassava (*Manihot esculenta* Crantz)—A potential Source of phytochemicals, food and nutrition—An updated review. *Efood*, 5(1), e127. <https://doi.org/10.1002/efd2.127>

Siritunga D, Sayre R 2004 Engineering cyanogen synthesis and turnover in cassava (*Manihot esculenta*) *Plant Mol. Biol.* 56 661–9

Thirumdas R, Trimukhe A, Deshmukh R, Annapure U: Functional and rheological properties of cold plasma treated rice starch. *Carbohydr Polym* 2017, 157:1723-1731.

Tylleskär, T., Banea, M., Bikangi, N., Fresco, L., Persson, L.A., Rosling, H. (1991) Epidemiological evidence from Zaire for a dietary etiology of konzo, an upper motor neuron disease. *Bull World Health Organ*, 69: 581–589.

Vasconcelos, A.T., Twiddy, D.R., Westby, A. And Reilly, P.J.A. (1990). Detoxification of cassava during gari preparation. *International Journal of Food Science and Technology*, 25:198– 203

Westby, A. And Choo, B.K. (1994). Cyanogen reduction during the lactic fermentation of cassava. *Acta Horticulturae*, 373: 209 – 215.

Wheatley, C.C. and Chuzel, G. (1993). Cassava: the nature of the tuber and use as raw material. In: Macrae, R., Robinson, R.K. and Sadler, M.J. (Eds). *Encyclopedia of food science, food technology and Nutrition*. Academic Press, San Diego, California, 734 – 743.

SENSORES FOTOELETROQUÍMICOS BASEADOS EM TiO_2 PARA DETERMINAÇÃO DE DOPAMINA

Data de submissão: 30/10/2024

Data de aceite: 02/12/2024

José Thiago do Nascimento Pereira

Instituto de Formação de Educadores –
IFE
Universidade Federal do Cariri – UFCA

Kerene Cristina Bedi

Instituto de Ciências Exatas e Natureza
– ICEN
Universidade da Integração Internacional
da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB

Claudimira Elisa Nginga Fula

Instituto de Ciências Exatas e Natureza
– ICEN
Universidade da Integração Internacional
da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB

Raiane Guilherme da Silva

Instituto de Ciências Exatas e Natureza
– ICEN
Universidade da Integração Internacional
da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB

Francisco Adjedam Gomes Oliveira

Instituto de Formação de Educadores –
IFE
Universidade Federal do Cariri – UFCA

Bruno Peixoto de Oliveira

Instituto de Formação de Educadores –
IFE
Universidade Federal do Cariri – UFCA

Francisco Wirley Paulino Ribeiro

Instituto de Ciências Exatas e Natureza
– ICEN
Universidade da Integração Internacional
da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB

RESUMO: Sistemas fotoeletroquímicos apresentam versatilidade em função das suas amplas aplicações. Dentre os óxidos semicondutores aplicados no desenvolvimento de dispositivos fotoeletroquímicos, destaca-se o dióxido de titânio (TiO_2), devido à sua baixa toxicidade, significativa estabilidade química e térmica. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver sensores fotoeletroquímicos com configuração simples a base de TiO_2 e avaliar sua aplicabilidade para a determinação de dopamina. Os fotoanodos foram preparados empregando duas fases cristalinas de TiO_2 (Anatase e Rutilo), a partir de três suspensões de TiO_2 10 mg mL^{-1} , compostas por diferentes proporções das fases em meio de dimetilformamida contendo Nafion® 1,0 %. Na sequência, 20,0 mL da suspensão sobre a superfície do FTO (1 cm^2), com secagem à temperatura de $26 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ por 1

hora. Alguns fotoanodos foram reservados para experimentos sem tratamento térmico, e a outra parte foi levada ao forno para calcinação, empregando a rampa de aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ até a temperatura desejada. Após 1 hora nessa temperatura, o sistema foi resfriado a uma taxa de $2\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$. As técnicas eletroquímicas: voltametria cíclica, voltametria linear e cronoamperometria foram empregados, na presença e ausência de iluminação artificial (LED Thorlabs®, 405 nm e 400 mW de potência) em tampão BR e tampão Fosfato ambos a $0,04\text{ mol L}^{-1}$. No Estudo 1, realizado com FTO/ TiO_2 sem tratamento térmico, os resultados mostraram que o FTO/ TiO_2 sintetizado a partir da mistura das fases na proporção de anatase/rutilo (50%/50%, m/m) mostrou melhor desempenho fotoeletroquímico. No Estudo 2, realizado com FTO/ TiO_2 tratados termicamente, o eletrodo com 100% anatase apresentou melhor desempenho fotoeletroquímico para a determinação de dopamina, evidenciada pelo aumento significativo da fotocorrente em comparação aos demais fotoanodos sem tratamento térmico. Sob as condições experimentais otimizadas a curva analítica para a dopamina foi linear no intervalo de $6,59 \times 10^{-7}\text{ mol L}^{-1}$ a $7,37 \times 10^{-6}\text{ mol L}^{-1}$. Os limites de detecção e quantificação calculados foram $2,90 \times 10^{-7}\text{ mol L}^{-1}$ e $9,68 \times 10^{-7}\text{ mol L}^{-1}$, respectivamente. O sistema fotoeletroquímico baseado no FTO/ TiO_2 mostrou-se promissor para o desenvolvimento de metodologias analíticas para a determinação de dopamina.

PALAVRAS-CHAVE: Sensor Fotoeletroquímico, Dopamina, TiO_2 .

ABSTRACT: Photoelectrochemical systems exhibit versatility due to their wide applications. Among the semiconductor oxides applied to development of photoelectrochemical devices, titanium dioxide (TiO_2) stands out, due to its low toxicity, significant chemical and thermal stability. In this perspective, the present work aimed to develop photoelectrochemical sensors with a simple configuration based on TiO_2 and to evaluate its applicability for the dopamine determination. The photoanodes were prepared using two crystalline phases of TiO_2 (Anatase and Rutile), from three TiO_2 10 mg mL^{-1} suspension, composed of different proportions of the phases in dimethylformamide medium containing 1.0 % Nafion®. Next, 20.0 mL of the TiO_2 suspension was dropped on the cleaned FTO (1 cm^2), and dried at $26 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 1h. Some photoanodes was reserved for experiments without heat treatment, and the other part was taken to the oven for calcination, using a heating ramp of $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ until the desired temperature. After 1 hour at this temperature, the system was cooled at a rate of $2\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$. The electrochemical techniques: Cyclic voltammetry, linear voltammetry, and chronoamperometry experiments were applied in the presence and absence of artificial lighting (LED Thorlabs®, 405 nm and 400 mW of power) in BR buffer and Phosphate buffer both at 0.04 mol L^{-1} . In Study 1, carried out with photoanodes without heat treatment, the results showed that the FTO/ TiO_2 synthesized from the mixture of phases in the proportion of anatase/rutile (50%/50%, m/m) showed better photoelectrochemical performance. In Study 2, performed with FTO/ TiO_2 thermally treated, 100% anatase showed better photoelectrochemical performance for the determination of DOP, evidenced by the significant increase in the photocurrent response compared to other photoanodes without heat treatment. Under the optimized experimental conditions, the analytical curve for dopamine was linear from $6.59 \times 10^{-7}\text{ mol L}^{-1}$ to $7.37 \times 10^{-6}\text{ mol L}^{-1}$. The detection and quantification limits calculated were $2.90 \times 10^{-7}\text{ mol L}^{-1}$ and $9.68 \times 10^{-7}\text{ mol L}^{-1}$, respectively. The photoelectrochemical system based on FTO/ TiO_2 proved to be promising for the dopamine determination.

KEYWORDS: Photoelectrochemical sensor, Dopamine, TiO_2 .

1 | INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o mundo moderno tem sentido mais de perto os impactos causados por diferentes problemáticas que demandam de estudos e ações urgentes, para manutenção da qualidade de vida a curto, médio e longo prazo. De acordo com estudos previamente publicados, pode-se destacar as novas demandas energéticas e a contaminação de matrizes aquosas como fatores preocupantes, que merecem foco da comunidade científica mundial, para o desenvolvimento de pesquisas que busquem mitigar e/ou contornar tais problemáticas (KHAN, *et al.*, 2020; SPITLER, *et al.*, 2020).

Desde a descoberta do efeito fotoelétrico, diversos estudos têm sido direcionados para a ideia de converter a luz em energia elétrica ou produção e estocagem de energia química (GRÄTZEL, 2001). Nesse contexto, os sistemas fotoeletroquímicos tem se mostrado bastante promissores para tal fim, como demonstrado no estudo pioneiro de Fujishima e Honda que mostraram a possibilidade de produzir hidrogênio via fotólise da água utilizando o TiO_2 aliado com radiação ultravioleta, proporcionando a capacidade de converter energia solar em energia química/elétrica de forma renovável e de baixo custo (FUJISHIMA; HONDA, 1972).

Os sistemas fotoeletroquímicos são sistemas versáteis que englobam algumas características e vantagens dos métodos eletroquímicos tradicionais e dos métodos ópticos, combinando fotorradiação com detecção eletroquímica (LI *et al.*, 2015; WU *et al.*, 2017). Esse processo consiste na conversão de fótons para eletricidade, resultante da separação e posterior transferência de carga após absorção de fótons durante a iluminação. A luz atua nesse processo como um impulsionador de elétrons, o que resulta na geração de energia elétrica ou química através de reações redox.

Um processo semelhante ocorre quando um material semicondutor absorve luz. Em um semicondutor, os orbitais eletrônicos estão imersos em uma banda de valência (BV) preenchida e uma banda de condução (BC) vazia, separadas por uma diferença de energia denominada *band-gap* (E_g). Desse modo, após absorção de fótons por um semicondutor, se a energia absorvida for superior ao *band-gap*, um elétron é promovido para a BC e um buraco, de carga oposta é formado na BV do semicondutor. A formação do par elétron/buraco (e^-/h^+) resulta na formação de um estado excitado no semicondutor. Contudo, estados excitados são instáveis e tendem a levar a uma recombinação entre os pares e^-/h^+ fotogerados. Dessa forma, torna-se essencial a separação dos pares para evitar a recombinação, e tal separação pode ser promovida por meio de uma diferença de potencial elétrico ou utilizando espécies aceitadoras ou doadoras de elétrons, que realizam a captura dos elétrons ou dos buracos fotogerados e transformam energia em energia química redox (GRÄTZEL, 2001).

Nesse contexto, os sistemas fotoeletroquímicos baseados em óxidos semicondutores podem ser considerados como dispositivos versáteis em função das suas amplas aplicações, tais como: exploração de fontes alternativas de energia, degradação de poluentes ambientais e o desenvolvimento de sensores e metodologias analíticas (YU *et al.*, 2019; PANG *et al.*, 2020). Dentre essas aplicações, estudos recentes apresentados na literatura têm mencionado a aplicação de materiais semicondutores para a construção de sensores e biossensores (YAN, *et al.*, 2018; DAI, *et al.*, 2017). Esse tipo de sensor consiste em um tipo de dispositivo baseado nas propriedades semicondutoras de alguns materiais, onde a detecção ocorre pelo processo de transferência de elétrons fotoinduzidos na interface eletrodo/solução. Estes sensores combinam as vantagens dos sensores eletroquímicos e ópticos, tais como baixo sinal de fundo, alta sensibilidade, instrumentação simples, baixo custo, portabilidade e fácil miniaturização, pois possuem a capacidade de acoplar o processo de fotoexcitação com detecção eletroquímica (MOAKHAR *et al.*, 2017; GE *et al.*, 2019).

O mecanismo de detecção dos sensores fotoeletroquímicos baseia-se na mudança da fotocorrente, que é gerada pelas interações físicas/químicas entre analitos e os materiais semicondutores, de modo que a corrente pode ser relacionada com a concentração do analito de interesse. Desse modo, o desempenho analítico destes sensores é influenciado pelos materiais que compõe os eletrodos, haja vista que a eficiência de conversão fotoelétrica do sensor depende principalmente de materiais fotoativos imobilizados no eletrodo (DEVADOSS *et al.*, 2015; SHEN *et al.*, 2015).

Atualmente, diversos materiais baseados em óxidos semicondutores têm sido estudados e preparados para a aplicação em sensores fotoeletroquímicos. Dentre estes, o TiO_2 é um dos semicondutores mais utilizados devido seu baixo custo, não toxicidade e estabilidade. A sua fotoatividade apresenta-se na região do ultravioleta com energia de band-gap igual a 3,2 eV (FUJISHIMA; HONDA, 1972). Os sensores fotoeletroquímicos baseados no TiO_2 já foram aplicados para determinação de espécies de interesse biológico (YAN *et al.*, 2015, LI *et al.*, 2017; SOUSA *et al.*, 2020), metais pesados (MOAKHAR *et al.*, 2015) e pesticidas (CHENG *et al.*, 2019).

Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver sensores fotoeletroquímicos de configuração simples baseados em TiO_2 e avaliar sua aplicabilidade para a determinação de dopamina (DOP).

2 | REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sensores fotoeletroquímicos

Nos últimos anos, pesquisas voltadas ao desenvolvimento de dispositivos analíticos cada vez mais eficazes tem sido o foco de vários esforços da comunidade científica internacional. Os requisitos exigidos para novos dispositivos analíticos são precisão,

exatidão, sensibilidade e seletividade, além de baixo custo e possibilidade de adaptação para medidas em campo (STOYTCHÉVA, 2011). É nesta perspectiva que os sensores químicos se apresentam como dispositivos com grande potencial para análise de grande variedade de espécies químicas e biológicas, sendo capazes de fornecer informações químicas ou físicas de um sistema, convertendo essa informação em um sinal analítico mensurável.

Sensores químicos, de modo geral, são instrumentos utilizados para medir a concentração de uma espécie química em uma amostra de interesse. São compostos basicamente por três unidades funcionais: (1) uma parte receptora que é sensível à determinada característica do sistema; (2) um transdutor cuja função é converter as informações obtidas em um sinal analítico e; (3) um amplificador de sinal responsável pela amplificação do sinal analítico de modo que possa ser analisado através do dispositivo de saída (SANTOS, 2017). Na literatura, há uma quantidade considerável de sensores baseados em diversos tipos de transdução, dentre os quais é possível mencionar classes como: sensores ópticos, sensores elétricos e sensores eletroquímicos. A Figura 1 mostra um esquema de sensor químico.

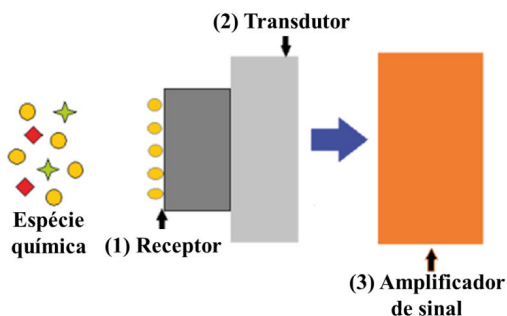


Figura 1- Representação esquemática de um sensor químico.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Além das classes mencionadas, outro importante grupo de dispositivos tem despertado o interesse da comunidade científica devido a sua alta sensibilidade, ampla faixa de linearidade, rápida detecção e excelente razão sinal/ruído (HUN *et al.*, 2017), os sensores fotoeletroquímicos. Esses consistem em um tipo de dispositivo analítico que se baseia nas propriedades semicondutoras de alguns materiais, apresentando características e vantagens dos métodos eletroquímicos tradicionais combinadas as dos métodos ópticos, aliando fotorradiação com detecção eletroquímica (LI *et al.*, 2015; WU *et al.*, 2017).

A análise fotoeletroquímica é um procedimento recém desenvolvido que vem despertando interesse crescente em química analítica. Essa nova metodologia analítica apresenta vantagens, tais como: a redução do sinal de fundo não desejado, elevada

sensibilidade, possibilidade de miniaturização dos dispositivos de detecção, baixo custo, portabilidade e fácil automação (LI *et al.*, 2015; ZHANG *et al.*, 2015).

O mecanismo de detecção dos sensores fotoeletroquímicos baseia-se na interação entre as espécies fotoativas do semicondutor e a luz. Nesse processo, a absorção de energia luminosa por parte dos átomos ou moléculas dos semicondutores provoca a transferência de elétrons do orbital de menor energia (banda de valência – BV) para um de energia maior (banda de condução – BC), devido a frequência da luz ser igual ou maior que a energia de *band-gap* (região proibida - E_g), que é a diferença de energia entre os orbitais. Desse modo, há a formação de pares de elétron/lacunas (e^-/h^+), dando origem a um estado de excitação no semicondutor (BARD, 1980; DEVADOSS *et al.*, 2015).

Os pares (e^-/h^+) fotogerados no semicondutor irradiado por luz podem ocasionar a oxidação ou redução de uma espécie em solução, de modo que a geração de fotocorrente pode ocorrer por meio de um processo anódico ou catódico, a depender da natureza doadora ou receptora da espécie em solução (WANG *et al.*, 2009; WANG *et al.*, 2014).

O processo de geração de fotocorrente anódica na célula eletroquímica ocorre devido a oxidação de uma espécie em solução que atua como agente redutor, doando elétrons para a BV do semicondutor. Já a geração de fotocorrente catódica acontece quando uma espécie em solução atua como agente oxidante, recebendo elétrons da BC do semicondutor. Dessa forma, a concentração da espécie em solução pode ser relacionada com a fotocorrente gerada, haja vista que estas são proporcionais, sendo possível quantificar diversos tipos de analito de interesse.

O desempenho analítico de sensores fotoeletroquímicos está intimamente relacionado à eficiência de fotoconversão que depende diretamente dos materiais fotoativos imobilizados na superfície do eletrodo (DEVADOSS *et al.*, 2015). Portanto, o desenvolvimento de materiais semicondutores é uma etapa crucial para a construção dos dispositivos e sua aplicação na determinação de espécies de interesse ambiental e biológico.

2.2 Dióxido de titânio (TiO_2) empregado em sensores fotoeletroquímicos

Ao longo dos anos, um grande número de semicondutores com propriedades fotoeletroquímicas, incluindo óxidos metálicos, sulfetos metálicos e calcogenetos, têm sido extensivamente estudados (CHEN *et al.*, 2010). Dentre estes, óxidos metálicos nanoestruturados, como o dióxido de titânio (TiO_2), têm sido amplamente explorados devido às suas excelentes propriedades catalíticas, ópticas e elétricas.

O TiO_2 é um dos óxidos semicondutores mais empregados atualmente para o desenvolvimento de sensores fotoeletroquímicos devido ao seu baixo custo, abundância, boa estabilidade química e excelente atividade fotocatalítica (YAN *et al.*, 2015). Trata-se de uma substância não tóxica muito usada como pigmento branco em tintas, cosméticos,

plásticos e papéis, por exemplo, além de ser extensivamente aplicado em células solares devido à sua fotoatividade que apresenta-se na região do ultravioleta com energia de *band-gap* (E_g) que varia entre 3,2 eV e 1,9 eV, a depender da forma cristalina (HONDA; FUJISHIMA, 1972).

A morfologia, tamanho de partícula, grau de cristalinidade, fase cristalina, área superficial e porosidade são parâmetros que influenciam nas propriedades estruturais, ópticas e elétricas do TiO_2 . Esses parâmetros, por sua vez, são influenciados pelo tratamento térmico realizado na obtenção dos materiais e na preparação de filmes (REDDY *et al.*, 2015; LACERDA, 2018). Estudos como o de Sansiviero e Faria (2015) observaram que a presença de diferentes fases cristalinas de TiO_2 em filmes é um dos parâmetros que podem ser controlados por meio do tratamento térmico, o que indica que a composição das fases pode variar de acordo com a temperatura empregada.

Existem três formas cristalinas de TiO_2 : rutilo (tetragonal, $E_g = 3,0$ eV, 411 nm), anatase (tetragonal, $E_g = 3,2$ eV, 387 nm) e bruquita (ortorrômbica, $E_g = 1,9$ eV, 653 nm), podendo ser encontradas na forma de minerais naturais ou preparados sinteticamente. As duas primeiras formas do TiO_2 são as mais aplicadas em sistemas fotoeletroquímicos. De acordo com a literatura, o rutilo é a fase termodinamicamente mais estável, no entanto, a fase anatase apresenta maior condutividade e menor recombinação dos portadores de carga sendo, portanto, mais utilizada para aplicação em células solares, se destacando também em aplicações fotoeletroquímicas (SHEN *et al.*, 2018; SALEIRO *et al.*, 2010).

Ao longo dos anos, diversos tipos de sensores fotoeletroquímicos baseados no TiO_2 com variadas configurações foram desenvolvidos e aplicados para determinação de diversos tipos de compostos químicos, como: metais pesados (MOAKHAR *et al.*, 2015), pesticidas (CHENG *et al.*, 2019) e espécies de interesse ambiental (WU; YANG; ZHAO, 2019; SU *et al.*, 2019) e biológico (YAN *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2019). Dentre os diversos compostos estudados na literatura por meio da utilização de sensores fotoeletroquímicos, a DOP é uma das espécies químicas que têm atraído a atenção de vários pesquisadores devido a sua importância clínica, sendo utilizada como molécula modelo no desenvolvimento de sensores eletroquímicos.

2.3 Cloridrato de Dopamina

A DOP ou Cloridrato de DOP, 3,4-dihidroxifeniletilamina, cuja fórmula estrutural é apresentada na Figura 2, é um neurotransmissor do grupo das catecolaminas (aminas ativas que apresentam em sua estrutura química o anel catecol), precursor metabólico da adrenalina e da noradrenalina, que atua em receptores específicos presentes no sistema nervoso central, nos vasos mesentéricos, renais e nas coronárias (BRASIL, 2010). Como fármaco de uso restrito em ambiente hospitalar, a DOP é empregada como agente vasoconstritor e hipertensor, auxiliando no tratamento de diversos tipos de choque e de

hipotensão grave após infarto agudo do miocárdio. Destaca-se também no tratamento de pacientes com baixos níveis de DOP como os esquizofrênicos e parkinsonianos (STANDAERT; GALANTER, 2009).

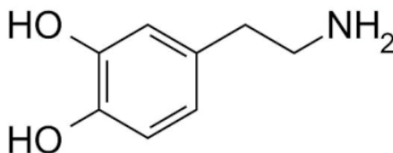


Figura 2 - Fórmula estrutural da Dopamina (DOP).

Fonte: Brasil (2010)

No Brasil o fármaco DOP é comercializado na forma de ampolas de 10 ml contendo 5 mg/mL de cloridrato de DOP (LUPETTI *et al.*, 2003) e os excipientes cloreto de sódio, bissulfito de sódio (agente antioxidante) e água purificada. O medicamento possui apresentação incolor ou levemente amarelada, haja vista que outras variações de cores não são comuns e geralmente podem indicar fotólise e oxidação do fármaco (BRASIL, 2010).

A concentração anormal de DOP no sistema nervoso central pode resultar em doenças como o Parkinson e o Alzheimer, além de distúrbios de hiperatividade e esquizofrenia. Portanto, é fundamental o desenvolvimento de um método econômico, de resposta rápida, sensível e eficiente para detecção de DOP. Diversos métodos podem ser encontrados na literatura para determinação e quantificação de DOP em amostras biológicas e formulações farmacêuticas, incluindo fluorescência (ZHAO *et al.*, 2016), quimioluminescência (ZHAO *et al.*, 2011), cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC-MS) (CARRERA *et al.*, 2015) e eletroforese capilar (EC) (SCHÖNING, *et al.*, 2005). No entanto, esses métodos costumam ser demorados e envolvem operação bastante complexa, além de possuir um custo elevado.

Nessa perspectiva, estudos recentes apresentados na literatura têm mencionado a utilização de sensores e biossensores fotoeletroquímicos baseados em TiO_2 para determinação de DOP, apresentando versatilidade, baixo custo, rapidez e sensibilidade comparáveis às das técnicas tradicionais.

Cai e colaboradores (2015), apresentaram um sensor fotoeletroquímico sintetizado usando a composição de nitreto de carbono grafítico ($\text{g-C}_3\text{N}_4$), nanopartículas de TiO_2 e grafeno em um eletrodo de óxido de índio e estanho (ITO) para determinação de DOP. O sistema proposto apresentou excelente seletividade, reprodutibilidade e estabilidade, com limite de detecção de $2,0 \times 10^{-8} \text{ mol L}^{-1}$.

Gao *et al.* (2015) empregaram um sensor fotoeletroquímico baseado em TiO_2 Anatase para a determinação de DOP sob irradiação de luz visível. O sistema apresentou estabilidade aceitável, reprodutibilidade e uma ampla faixa linear. O LD calculado foi $2,0 \times$

$10^{-8} \text{ mol L}^{-1}$.

Yan *et al.* (2015) utilizando fotoanodos a base de pontos quânticos de grafeno e TiO_2 para determinação de DOP em plasma humano, obteve exatidão e precisão aceitáveis com uma ampla faixa linear e baixo LD de $6,7 \times 10^{-9} \text{ mol L}^{-1}$.

Neto, Silva Luz e Damos (2016) empregaram um sensor fotoeletroanalítico baseado em nanopartículas de TiO_2 /Ftalocianina tetrassulfonada de cobre para detecção de DOP explorando irradiação de diodo emissor de luz, em amostras de urina. O LD obtido foi de $5,0 \times 10^{-7} \text{ mol L}^{-1}$.

Qin *et al.* (2018) utilizaram um microssensor de matriz de nanotubos fotoeletroquímicos CdSe/TiO_2 para detecção in situ de alta resolução de DOP em amostras de urina. O sistema obteve LD de $1,67 \times 10^{-5} \text{ mol L}^{-1}$.

Chen *et al.* (2018) propuseram um sensor fotoeletroquímico acionado por luz visível para DOP baseado em cristais fotônicos opais inversos (IOPCs) de TiO_2 tridimensional (3D) imobilizado e pontos quânticos de perovskita (PQD). O sistema foi testado em amostras de soro humano e obteve LD de $1,2 \times 10^{-8} \text{ mol L}^{-1}$.

Zhang *et al.* (2019) propuseram um sensor a base de nanocompósitos de ouro- TiO_2 , que exibiu boa estabilidade e seletividade para a detecção de DOP em soro bovino na presença de várias interferências possíveis, obtendo um LD de $2,3 \times 10^{-8} \text{ mol L}^{-1}$.

A maioria desses estudos apresentam a utilização de fotoanodos de TiO_2 associados ou dopados com algum outro material semicondutor, e apesar das propriedades interessantes desse semicondutor pesquisas baseadas em configurações simples de dispositivos fotoeletroquímicos ainda são escassas na literatura.

3 | OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

- Desenvolver um sensor fotoeletroquímico baseado no óxido semicondutor TiO_2 para determinação de DOP.

3.2 Objetivos específicos

- Preparar óxidos semicondutores a base de TiO_2 ;
- Caracterizar os filmes semicondutores por meio das técnicas: voltametria linear, voltametria cíclica e cronoamperometria;
- Avaliar o efeito do tratamento térmico do TiO_2 sobre a resposta da DOP;
- Aplicar os sensores fotoeletroquímicos para determinação de DOP.

4 | PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Reagentes e soluções

4.1.1 Solução Tampão

Como eletrólito de suporte foram empregadas duas soluções tampões em fases distintas do estudo. O primeiro empregado foi o tampão Britton-Robinson (BR) $0,04 \text{ mol L}^{-1}$, preparado a partir de ácido acético $0,04 \text{ mol L}^{-1}$, ácido bórico $0,04 \text{ mol L}^{-1}$ e ácido fosfórico $0,04 \text{ mol L}^{-1}$. Para o ajuste do pH desejado foi utilizado uma solução de NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$. O segundo foi tampão fosfato $0,04 \text{ mol L}^{-1}$, preparado a partir de solução de fosfato monobásico $0,04 \text{ mol L}^{-1}$ + solução fosfato dibásico $0,04 \text{ mol L}^{-1}$.

4.1.2 Solução estoque de DOP

Para a preparação da solução estoque de DOP dissolveu-se massa suficiente do reagente em água destilada para perfazer 10 mL de solução com concentração de $1,0 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$. Todas as soluções foram preparadas e armazenadas sob refrigeração por no máximo uma semana.

4.1.3 Suspensões precursoras de TiO_2

As suspensões precursoras foram preparadas a partir de diferentes proporções de duas formas minerais de TiO_2 , a saber, anatase e rutilo dissolvidas em N,N – Dimetilformamida (DMF) e Nafion® 1%. Para a preparação das suspensões estoque de TiO_2 dissolveu-se massa suficiente de TiO_2 em N,N – Dimetilformamida e Nafion® 1% para perfazer 10 mg mL^{-1} . Todas as suspensões foram obtidas por auxílio de banho ultrassônico durante 30 minutos.

4.2 Instrumentação

Os experimentos eletroquímicos foram realizados usando potenciostato/galvanostato Autolab modelo PGSTAT204 controlado por um computador, usando o software NOVA versão 2.1. Para os experimentos fotoeletroquímicos foi empregada iluminação com um LED azul modelo M405L3 Thorlabs®, 405 nm, com potência de saída de 400 mW.

Todas as pesagens foram feitas utilizando-se uma balança analítica digital da Bioscale modelo FA2204 com precisão de $\pm 0,1 \text{ mg}$. As medidas de pH foram realizadas em um pHmetro modelo K39-0014PA (Kasvi®).

4.3 Preparação dos fotoanodos de TiO_2

Os fotoanodos de TiO_2 foram preparados sobre a superfície condutora das placas de vidro contendo óxido de estanho dopado com flúor (FTO, do inglês *fluorine doped tin oxide*) de resistividade $\gg 7 \, \Omega \, \text{cm}^{-2}$. Antes de preparar os fotoanodos, as placas de FTO foram submetidas à limpeza. A limpeza inicial consistiu na lavagem das placas com água, seguido pela imersão em banho de ultrassom em meio de mistura de água/detergente neutro, acetona, e água destilada, respectivamente, ambos por 30 minutos.

Foram preparados fotoanodos de TiO_2 a partir de diferentes soluções precursoras, preparadas a partir de diferentes proporções de duas formas minerais de TiO_2 , a saber, anatase e rutilo dissolvidas em N,N – Dimetilformamida e Nafion® 1%. Todas as suspensões foram obtidas por auxílio de banho ultrassônico durante 30 minutos.

A preparação dos filmes de TiO_2 propriamente dita, foi realizada por *drop-casting*, sendo adicionada uma alíquota ($20 \mu\text{L} \, \text{cm}^{-2}$) de suspensão precursora de TiO_2 ($10 \, \text{mg} \, \text{mL}^{-1}$) sobre a superfície do FTO. A Figura 3 apresenta o esquema de preparo do sensor. Após a evaporação do solvente e eventual secagem do material depositado sobre o FTO uma parte dos filmes foi reservada para eventuais experimentos com fotoanodos sem tratamento térmico (Estudo 1), e a outra parte foi levada ao forno para calcinação (Estudo 2), empregando a rampa de aquecimento de $10 \, ^\circ\text{C} \, \text{min}^{-1}$ até a temperatura desejada. Após 1 hora nessa temperatura, o sistema foi resfriado a uma taxa de $2 \, ^\circ\text{C} \, \text{min}^{-1}$.

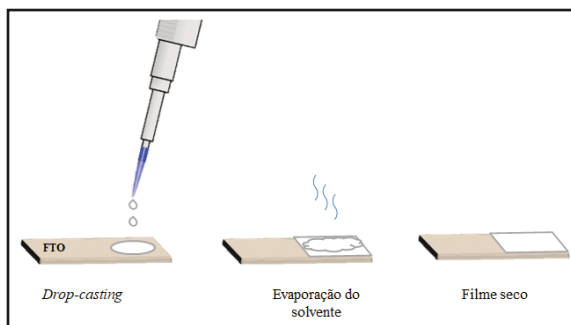


Figura 3 - Representação esquemática para obtenção do filme de TiO_2 .

Fonte: Elaborada pelos autores.

4.4 Metodologia

4.4.1 Desempenho fotoeletroquímico dos fotoanodos de TiO_2

Experimentos de voltametria cíclica (VC), voltametria linear (VL) e cronoamperometria foram empregados para avaliar o desempenho dos fotoanodos de TiO_2 . Para a montagem da célula eletroquímica foram utilizados como eletrodos de trabalho fotoanodos de FTO/ TiO_2 , preparados conforme descrito anteriormente em 4.3. Como eletrodo de referência foi usado

um eletrodo de $\text{Ag/AgCl/KCl}_{\text{sat.}}$, e como eletrodo auxiliar foi utilizado uma placa de platina, todos acoplados a uma célula convencional com os eletrodos ligados a um potenciostato. Todos os experimentos fotoeletroquímicos foram realizados na ausência e na presença de iluminação artificial, empregando como fonte de radiação um LED azul (Thorlabs®) de 405 nm, com potência de saída de 400 mW.

4.4.2 Estudo do comportamento fotoeletroquímico dos fotoanodos de TiO_2 sem tratamento térmico na presença e ausência de Dopamina

Inicialmente, como parte do Estudo 1, foi realizado um estudo com fotoanodos de TiO_2 sintetizados a partir de diferentes proporções de duas formas minerais de TiO_2 , Anatase e Rutilo e sem tratamento térmico, sendo que a secagem dos filmes foi realizada em temperatura ambiente. A Tabela 1 traz os valores das proporções de cada forma de TiO_2 usada.

Inicialmente, experimentos de voltametria cíclica na ausência e presença de iluminação em meio de Na_2SO_4 $0,1 \text{ mol L}^{-1}$, foram empregados para avaliar o comportamento fotoeletroquímico dos fotoanodos A, B, e C. Posteriormente, experimentos de voltametria cíclica foram novamente utilizados para avaliar o desempenho do fotoanodo com melhor performance no teste anterior, na presença e ausência de iluminação artificial (LED azul) em tampão BR e tampão Fosfato ambos a $0,04 \text{ mol L}^{-1}$. Após a otimização foram construídas curvas de calibração empregando a técnica de voltametria linear. As curvas analíticas em eletrólito de suporte foram construídas pela adição de alíquotas da solução padrão de DOP $1,0 \times 10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$ na célula eletroquímica. Uma vez adicionada a alíquota, um voltamograma linear era obtido na presença e na ausência de iluminação. A partir das curvas de calibração foi calculado o limite de detecção.

Fotoanodo	TiO_2 – Anatase	TiO_2 – Rutilo
A	10 mg	0
B	5,0 mg	5,0 mg
C	0	10 mg

Tabela 1 - Proporções das misturas de TiO_2 anatase e rutilo utilizadas para síntese dos fotoanodos.

Fonte: Elaborada pelos autores.

4.4.3 Estudo do comportamento fotoeletroquímico dos fotoanodos de TiO_2 com tratamento térmico na ausência e presença de Dopamina

Em sequência, como parte do Estudo 2, foi realizado um estudo com fotoanodos de TiO_2 sintetizados a partir das diferentes proporções de duas formas minerais de TiO_2 , Anatase e Rutilo (Tabela 1), dessa vez com tratamento térmico. O tratamento térmico, como descrito em 3.3 consistiu na calcinação dos filmes de TiO_2 , após secagem do solvente, empregando a rampa de aquecimento de $10 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$ até 500°C . Após 1 hora nessa

temperatura, o sistema foi resfriado a uma taxa de $2\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$. Experimentos de voltametria cíclica na ausência e presença de iluminação e de DOP em meio tamponado com tampão BR $0,04\text{ mol L}^{-1}$ foram empregados para avaliar o comportamento fotoeletroquímico da DOP.

Posteriormente, foram realizados novos experimentos utilizando fotoanodos de FTO/TiO₂ (100% anatase) tratados em temperaturas diferentes, a saber, 100°C , 300°C e 500°C , respectivamente. Após a otimização foram construídas curvas analíticas empregando a técnica de cronoamperometria. As curvas analíticas em eletrólito de suporte foram construídas pela adição de alíquotas da solução padrão de DOP $9,95 \times 10^{-5}\text{ mol L}^{-1}$ na célula eletroquímica. Uma vez adicionada a alíquota, um cronoamperograma era obtido na presença e na ausência de iluminação. A partir das curvas de calibração foi calculado o limite de detecção.

5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Aplicação do FTO/TiO₂ sem tratamento térmico para a detecção de Dopamina

Para avaliar o desempenho do sensor proposto, experimentos fotoeletroquímicos foram realizados empregando VC na faixa de $-0,1$ a $1,0\text{ V}$ em Na₂SO₄ $0,1\text{ mol L}^{-1}$ com velocidade de varredura de 20 mV s^{-1} na ausência e presença de iluminação. A Figura 4 apresenta os voltamogramas cíclicos obtidos para os FTO/TiO₂ A (100% Anatase), B (50%/50%, m/m, anatase/rutilo) e C (100% Rutilo) de acordo com os parâmetros detalhados acima.

A partir desses experimentos foi observado a presença de fotocorrente referente a oxidação da água sobre o FTO/TiO₂. Os valores calculados de fotocorrente para os fotoanodos preparados em diferentes proporções de TiO₂ foram $6,94 \times 10^{-7}\text{ A}$ (50%/50%, anatase/rutilo) (Figura 4b), $5,85 \times 10^{-7}\text{ A}$ (100% Anatase) (Figura 4a) e $1,33 \times 10^{-7}\text{ A}$ (100% Rutilo) (Figura 4c), respectivamente. Esses resultados indicam possivelmente sinergismo das duas fases combinadas, exercendo influência na resposta fotoeletroquímica. Sobre esse efeito, Yan *et al.*, (2018) descreveram em seu trabalho que a junção de dois semicondutores com formas diferentes poderia melhorar a separação de cargas interfaciais, devido às suas posições e intervalos de borda de banda. Incorporando as formas anatase e rutilo do TiO₂, os autores relataram que houve uma supressão da recombinação de cargas de modo que a capacidade fotocatalítica pudesse ser fortalecida. Assim, para a modificação do gap, a mistura do TiO₂ na forma anatase com a forma rutilo forneceu uma heterojunção na qual o segundo semicondutor (rutilo) serve como um fotossensibilizador o qual forma um campo elétrico interno através da interface que reduz a capacidade de recombinação dos pares elétrons/lacunas fotogerados.

Além do efeito descrito acima, foi possível observar também que na proporção 50/50 foi observada melhor aderência e estabilidade do filme. Em função dos resultados

obtidos, para dar sequência ao trabalho foi selecionado o fotoanodo FTO/TiO₂ B (50%/50%, anatase/rutilo).

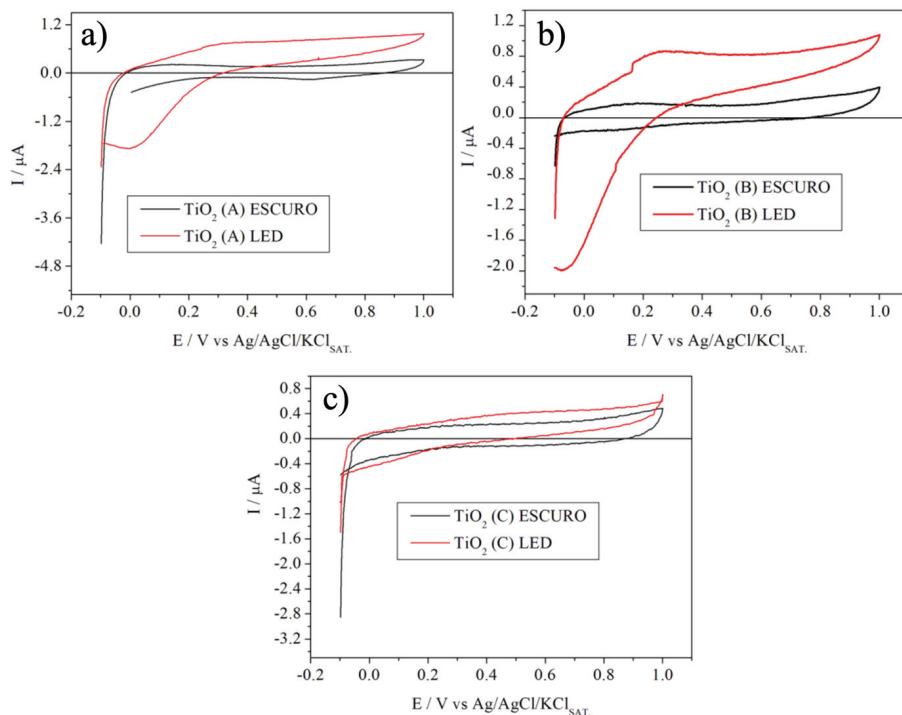


Figura 4 – Voltametrias cíclicas obtidos para os eletrodos FTO/TiO₂ com diferentes proporções de anatase/rutilo, a (100% anatase), b (50%/50%, anatase/rutilo) e c (100% rutilo), em Na₂SO₄ 0,1 mol L⁻¹, com velocidade de varredura de 20 mV s⁻¹, na ausência e presença de iluminação.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Na sequência dos estudos, experimentos de VC na faixa de -0,1 V a 1,0 V com $v = 20 \text{ mV s}^{-1}$ em meio tamponado com tampão BR 0,04 mol L⁻¹ pH 7,0, na presença de DOP $1,02 \times 10^{-5} \text{ mol L}^{-1}$ mostraram que na ausência de iluminação houve um processo de oxidação irreversível em torno de 0,2 V (Figura 5a). Com iluminação foi observado o mesmo processo de oxidação irreversível para a DOP, contudo, iniciando em torno de 0,15 V e com maior intensidade de corrente (Figura 5b). Esses resultados indicam que o processo de oxidação da DOP foi facilitado devido a sua reação nas lacunas fotogeradas na superfície do TiO₂ após a iluminação, e que a fotocorrente observada foi gerada por meio de um processo anódico. Isso se deve ao fato do analito servir como uma espécie doadora de elétrons ao receber energia oriunda da lâmpada LED, fazendo com que os elétrons saltem da banda de valência - BV para a banda de condução - BC deixando espaços de carga oposta à dos elétrons. Assim, ocorre a fotogeração dos pares elétrons-lacunas (bandas de valência - BV e condução BC, respectivamente) na superfície do material compósito.

Com o surgimento das lacunas na BV, as mesmas recebem elétrons da molécula de DOP promovendo um aumento da corrente anódica do sistema na presença de luz.

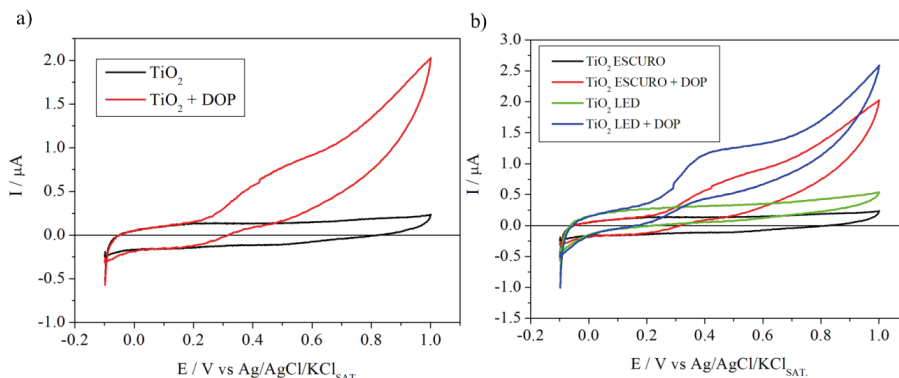


Figura 5 - Voltametrias Cíclicas obtidas para FTO/TiO₂ (50%/50%, anatase/rutilo) em tampão BR 0,04 mol L⁻¹ pH = 7,0, com velocidade de varredura de 20 mV s⁻¹, a) sem iluminação; b) sob iluminação com LED azul. Ambas na presença de DOP 1,02 x 10⁻⁵ mol L⁻¹.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Com base nesses resultados foi realizado um estudo do eletrólito de suporte utilizando soluções tampão BR e tampão fosfato, ambos com concentração 0,04 mol L⁻¹ e pH na faixa de 7,0 – 10,0 na célula fotoeletroquímica. Neste estudo, as maiores intensidades de fotocorrente obtidas para o fotoanodo de TiO₂ foram observadas em tampão BR com pH = 7,0. Além disso, esse mesmo meio proporcionou maior intensidade de fotocorrente se comparado com o resultado obtido em tampão fosfato com pH = 7,0.

Após a otimização foi realizada a construção de uma curva analítica em eletrólito de suporte (tampão BR) com pH = 7,0 por meio da adição de alíquotas da solução padrão de DOP 9,94 x 10⁻⁴ mol L⁻¹ na célula eletroquímica e empregando a técnica de VL. Uma vez adicionada uma alíquota, uma voltametria linear era obtida na presença de iluminação (LED azul). As adições sequenciais de solução padrão de DOP, com concentrações na faixa de 3,04 x 10⁻⁷ mol L⁻¹ a 8,81 x 10⁻⁶ mol L⁻¹ foram usadas para a construção da curva analítica.

A intensidade de fotocorrente (Δi) apresentou comportamento linear em função da concentração de DOP na faixa de 3,04 x 10⁻⁷ mol L⁻¹ a 8,81 x 10⁻⁶ mol L⁻¹. A curva analítica foi descrita pela equação da reta: $I = -1,10 \times 10^{-8} \pm 1,60263 \times 10^{-8} + 9,96 \times 10^{-2} \pm 3,96 \times 10^{-3}[\text{DOP}]$ com coeficiente de correlação $R = 0,99193$ ($n = 12$). A partir da curva analítica os valores de limite de detecção (LD) e limite de quantificação (LQ) foram calculados. LD, por definição, é a menor concentração do analito em análise que pode ser detectada, mas não necessariamente pode ser quantificada, empregando um determinado procedimento experimental. LQ é definido como a menor concentração do analito que pode ser quantitativamente determinada. As relações matemáticas empregadas para o cálculo do LD e LQ foram aquelas recomendadas pela IUPAC (MOCÁK et al., 1997). As equações

podem ser vistas a seguir:

$$LD = \frac{3xS_D}{b} \quad (1)$$

$$LQ = \frac{10xS_D}{b} \quad (2)$$

Em que S_D é o desvio padrão da média de dez medidas do branco, e b é a inclinação da curva analítica. O limite de detecção (LD) calculado foi de $1,15 \times 10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$ e o limite de quantificação (LQ) de $3,82 \times 10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$.

Como conclusões, os resultados mostraram que o sistema fotoeletroquímico baseado no FTO/TiO₂ mostrou-se promissor para o desenvolvimento de metodologias analíticas. No que se refere aos fotoanodos sem tratamento térmico o FTO/TiO₂ com proporção de 50% anatase/50% rutilo mostrou melhor desempenho por possuir aderência e resposta fotoeletroquímica e que utilizado em meio de tampão BR mostrou-se promissor para análise de DOP.

5.2 Aplicação do FTO/TiO₂ com tratamento térmico para a detecção de Dopamina

Os experimentos fotoeletroquímicos foram realizados empregando VC na faixa de $-0,1$ a $1,0 \text{ V}$ em meio tamponado com tampão BR $0,04 \text{ mol L}^{-1}$ com 20 mV s^{-1} na ausência e presença de iluminação. Os fotoanodos utilizados foram FTO/TiO₂ A (100% Anatase), B (50%/50%, anatase/rutilo) e C (100% Rutilo) ambos tratados termicamente empregando rampa de aquecimento de $10 \text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ até 500°C . As maiores intensidades de fotocorrente foram obtidas pelo FTO/TiO₂ A (100% Anatase), que demonstrou melhor estabilidade e sensibilidade à iluminação quando comparados aos demais fotoanodos. Esse resultado condiz com o encontrado na literatura, haja vista que a fase anatase do TiO₂ é a mais opticamente ativa, devido a maior presença de vacâncias de oxigênio que garantem maior condutividade eletrônica e menor velocidade de recombinação do par elétron/buraco em relação às demais fases (SHEN *et al.*, 2018; SALEIRO *et al.*, 2010). A Figura 6 apresenta os voltamogramas cíclicos obtidos para os FTO/TiO₂ A (100% Anatase), de acordo com os parâmetros detalhados acima.

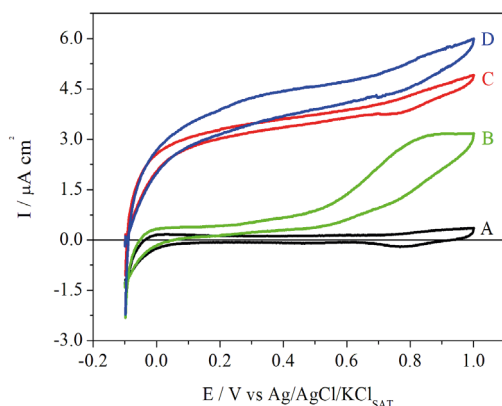


Figura 6 - Voltametrias Cíclicas obtidas para FTO/TiO₂ (100% anatase) em tampão BR 0,04 mol L⁻¹ pH = 7,0, com velocidade de varredura de 20 mV s⁻¹, em que A: sem iluminação; B: sem iluminação + DOP 1,02 x 10⁻⁵ mol L⁻¹; C: sob iluminação; e D: sob iluminação + DOP 1,02 x 10⁻⁵ mol L⁻¹.

Fonte: Elaborada pelos autores.

A partir dos experimentos de VC em tampão BR 0,04 mol L⁻¹, pH = 7,0 na ausência de iluminação foi observado o processo de oxidação irreversível da DOP sobre FTO/TiO₂ em torno do potencial 0,2 V. Contudo, com iluminação foi observado o mesmo processo de oxidação irreversível para a DOP iniciando em torno de 0,1 V e com maior intensidade de corrente. A fotocorrente calculada na ausência de DOP foi em torno de 3,17 x 10⁻⁶ A, enquanto na presença do analito houve um aumento evidente em torno de 3,89 10⁻⁶ A. Esses resultados indicam que o processo de oxidação da DOP foi facilitado devido a sua reação nas lacunas fotogeradas na superfície do TiO₂ após a iluminação, conforme o esquema demonstrado na Figura 7.

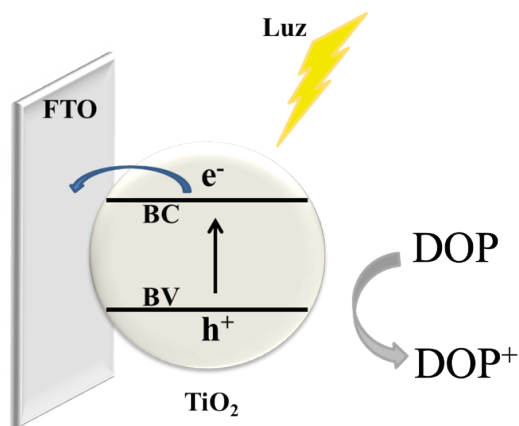


Figura 7 - Representação esquemática da oxidação da DOP sobre FTO/TiO₂ anatase sob luz visível.

Fonte: Elaborada pelos autores.

De acordo com Gao *et al.* (2015), que empregaram um sensor fotoeletroquímico baseado em TiO_2 anatase para a determinação de DOP sob irradiação de luz visível, a DOP enquanto agente redutor atuou como um doador de elétrons para capturar lacunas fotogeradas na banda de valência (BV) do TiO_2 , o que inibiu a recombinação elétron-lacuna e melhorou a resposta da fotocorrente. Além disso, a estrutura molecular da DOP permite a formação de um complexo bidentado irreversível entre os dois grupos ^-OH e os átomos de Ti na superfície do FTO/ TiO_2 , dando origem a um complexo de transferência de cargas, no qual há transferência instantânea de elétrons dos ligantes doadores do complexo diretamente para a BC do FTO/ TiO_2 sob irradiação de luz, sem uma transição através do estado excitado. Segundo os autores, a formação deste complexo de transferência de carga pode aumentar significativamente a absorção de luz pelo TiO_2 na faixa visível e melhorar a resposta da fotocorrente.

Outro achado interessante diz respeito ao desempenho alcançado pelo sistema FTO/ TiO_2 (100% anatase) tratado termicamente quando comparado ao mesmo fotoanodo sem tratamento. Como pode ser observado na Figura 8 houve a presença de fotocorrente referente à oxidação da água sobre o FTO/ TiO_2 . As fotocorrentes calculadas sem tratamento foram $3,18 \times 10^{-6}$ A e $3,80 \times 10^{-7}$ A, respectivamente, indicando que o tratamento térmico influenciou positivamente a resposta fotoeletroquímica do fotoanodo.

Como relatado na literatura consultada, parâmetros importantes como: a morfologia, o grau de cristalinidade, a fase cristalina, a área superficial e a porosidade dos filmes de TiO_2 são influenciadas pelo tratamento térmico, e isso possui impacto nas propriedades estruturais, ópticas e elétricas desse semiconductor. A anatase é uma fase metaestável e se transforma irreversivelmente para a fase rutilo (forma mais estável) após o aquecimento térmico, entretanto, esse processo não é instantâneo e costuma ocorrer em temperaturas elevadas (acima de 800°C) (RAO *et al.*, 2016). Desse modo, os resultados obtidos com o FTO/ TiO_2 (100% anatase) tratado termicamente indicam que não houve variação de fases do óxido semiconductor com a temperatura empregada, porém pode ter ocorrido um possível aumento na cristalinidade do material e melhoria das suas propriedades fotoeletroquímicas, observou-se uma significativa melhora no desempenho fotoeletroquímico, o que explicaria o aumento da estabilidade e sensibilidade dos fotoanodos.

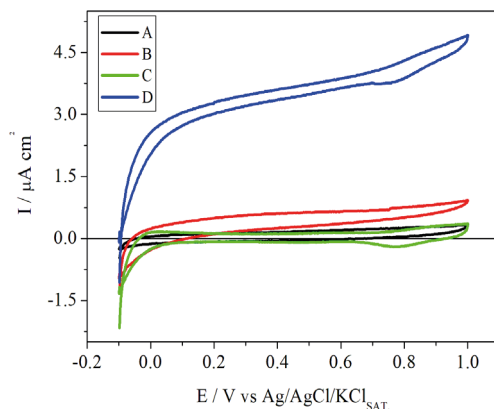


Figura 8 - Voltametrias Cíclicas obtidas para FTO/TiO₂ (100% anatase) em tampão BR 0,04 mol L⁻¹ pH = 7,0, com velocidade de varredura de 20 mV s⁻¹, em que A: TiO₂ sem calcinação (Escuro); B: TiO₂ sem calcinação (LED); C: TiO₂ calcinado (Escuro); e D: TiO₂ calcinado (LED).

Fonte: Elaborada pelos autores.

Em função dos resultados obtidos, para dar sequência ao trabalho foi selecionado o fotoanodo FTO/TiO₂ (100% anatase). Dando sequência aos estudos foram realizados novos experimentos utilizando fotoanodos de FTO/TiO₂ (100% anatase) tratados em temperaturas diferentes, a saber, 100°C, 300°C e 500°C, respectivamente. Observou-se que conforme o aumento da temperatura houve uma melhora significativa na aderência do material na superfície do FTO, com consequente aumento da estabilidade e sensibilidade do fotoanodo. O que explica o fato de que as respostas fotoeletroquímicas obtidas com o fotoanodo tratado termicamente à 500°C se mostraram mais intensas e estáveis tanto na ausência quanto na presença de DOP, como apresentado na Figura 9. Desse modo, optou-se por seguir o estudo utilizando fotoanodos tratados nessa temperatura.

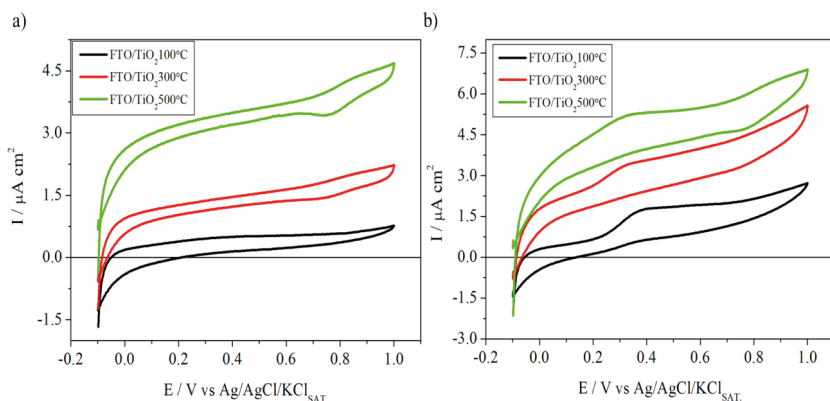


Figura 9 - Voltametrias Cíclicas obtidas para FTO/TiO₂ (100% anatase) calcinados em 100°C, 300°C e 500°C em tampão BR 0,04 mol L⁻¹ pH = 7,0, com velocidade de varredura de 20 mV s⁻¹, sob iluminação e a) ausência de DOP e b) presença de DOP 1,0 x 10⁻⁵ mol L⁻¹.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Na sequência foi realizado um estudo de pH do eletrólito de suporte empregando a técnica de cronoamperometria e utilizando soluções tampão BR com concentração $0,04 \text{ mol L}^{-1}$ e pH na faixa de 6,0 – 8,0 na célula fotoeletroquímica. Neste estudo, as maiores intensidades de fotocorrente obtidas para o fotoanodo de TiO_2 foram observadas em tampão BR com pH = 7,4. Selecionado o pH, experimentos de cronoamperometria foram utilizados para estudo do potencial a ser aplicado na construção das curvas de calibração. O potencial 0,4 V foi selecionado devido ao desempenho satisfatório do fotoanodo bem como a estabilidade das medidas realizadas em tampão BR $0,04 \text{ mol L}^{-1}$ pH = 7,4. Resultados semelhantes já foram reportados na literatura, porém, com experimentos realizados em meio tamponado com tampão fosfato $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ para determinação de DOP. Yan *et al.* (2015) utilizando fotoanodos a base de pontos quânticos de grafeno e TiO_2 (GQDs- TiO_2 /GCE), Cai *et al.* (2015) usando fotoanodos a base de nanopartículas de TiO_2 em nanofolhas de grafeno decoradas com g-C₃N₄ (G-C₃N₄/TiO₂), Neto, Silva Luz e Damos (2016) testando um sensor baseado em nanopartículas de TiO_2 /Ftalocianina tetrassulfonada de cobre, Qin *et al.* (2018) utilizando um microsensor de matriz de nanotubos fotoeletroquímicos (CdSe/ TiO_2), e Zhang *et al.* (2019) com fotoanodo a base de nanocompósitos de ouro- TiO_2 relataram melhor desempenho do fotoanodo para determinação de DOP em tampão fosfato $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ a pH = 7,4, sendo possível observar que a intensidade de fotocorrente aumentou conforme o aumento do pH até o valor 7,4 e, em seguida, diminuiu em pH maiores que este valor. Nesses estudos, a melhor resposta à DOP em tampão fosfato pode ser associada à alta mobilidade iônica do fosfato e íons potássio, possibilitando uma melhor transferência eletrônica entre o eletrodo e a solução. Entretanto, no presente estudo, efeito semelhante foi observado com tampão BR $0,04 \text{ mol L}^{-1}$, tendo em vista que os fotoanodos utilizados foram sintetizados apenas com TiO_2 , sem nenhum tipo de dopagem ou associação com outros materiais semicondutores.

Após a otimização foi realizada a construção de uma curva analítica em eletrólito de suporte (tampão BR) com pH = 7,4 por meio da adição de alíquotas da solução padrão de DOP $9,95 \times 10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$ na célula eletroquímica e empregando a técnica de cronoamperometria. Uma vez adicionada uma alíquota, um cronoamperograma era obtida na presença de iluminação (LED azul). As adições sequenciais de solução padrão de DOP, com concentrações na faixa de $6,59 \times 10^{-7} \text{ mol L}^{-1}$ a $7,37 \times 10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$ foram usadas para a construção da curva analítica (Figura 10).

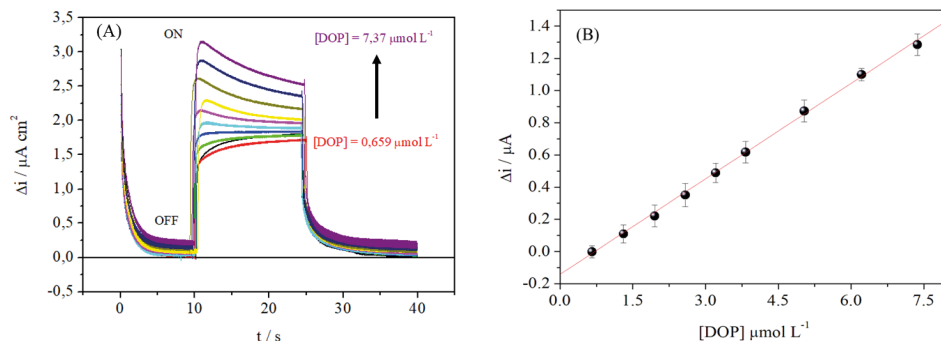


Figura 10 – (A) Cronoamperogramas para DOP em tampão BR 0,04 mol L⁻¹ pH = 7,4, sobre FTO/TiO₂ com E = 0,4 V e concentrações de DOP variando de 6,59 x 10⁻⁷ mol L⁻¹ a 7,37 x 10⁻⁶ mol L⁻¹ (B) Curva analítica para DOP construída a partir da diferença de fotocorrente entre as medidas cronoamperométricas realizadas na ausência e na presença de diferentes concentrações de DOP.

Fonte: Elaborada pelos autores.

A Figura 10 apresenta a curva analítica com os valores médios (n = 3) e com as respectivas barras de erro para cada ponto da curva. A intensidade de fotocorrente (Di) apresentou comportamento linear em função da concentração de DOP na faixa trabalhada. A curva analítica foi descrita pela equação da reta: $I = -1,45 \times 10^{-7} \pm 1,16 \times 10^{-9} + 1,97 \times 10^{-1} \pm 7,62 \times 10^{-3}[DOP]$ com coeficiente de correlação $R = 0,99928$ (n = 9). O limite de detecção calculado foi de $2,90 \times 10^{-7}$ mol L⁻¹ (0,29 μmol L⁻¹) e o limite de quantificação de $9,68 \times 10^{-7}$ mol L⁻¹ (0,97 μmol L⁻¹).

Com base nesses resultados e no valor de LD calculado o FTO/TiO₂ (100% anatase) mostrou-se promissor para o desenvolvimento de metodologias analíticas para análise de DOP. O valor de LD obtido foi maior do que os resultados obtidos em alguns estudos publicados na literatura, empregando sensores fotoeletroquímicos com TiO₂ associados ou dopados com algum outro material semiconductor, como é o caso de Chen *et al.* (2018) cujo LD calculado foi de $1,2 \times 10^{-8}$ mol L⁻¹, Yan *et al.* (2015) onde o LD foi de $6,7 \times 10^{-9}$ mol L⁻¹, Cai *et al.* (2015) com LD de $2,0 \times 10^{-8}$ mol L⁻¹, e Zhang *et al.* (2019) que obtiveram LD de $2,3 \times 10^{-8}$ mol L⁻¹.

Todavia, o valor de LD calculado para FTO/TiO₂ (100% anatase) mostrou-se menor do que os valores publicados por Gao *et al.* (2015), onde o LD calculado foi $2,0 \times 10^{-6}$ mol L⁻¹, Neto, Silva Luz e Damos (2016) no qual o LD foi de $5,0 \times 10^{-5}$ mol L⁻¹, e Qin *et al.* (2018) o qual obteve LD de $1,67 \times 10^{-5}$ mol L⁻¹. Isso sugere que o FTO/TiO₂ desenvolvido nesse trabalho mostrou um desempenho fotoeletroquímico satisfatório em resposta a DOP, tendo como vantagens uma configuração simples e baixo custo.

6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento de tecnologias alternativas para determinação de espécies químicas de interesse ambiental e biológico é um dos fatores fundamentais diante da necessidade de métodos cada vez mais rápidos, eficientes e de baixo custo. Nesse contexto, os sensores fotoeletroquímicos, como relatado na literatura, têm demonstrado elevada eficiência na determinação de espécies químicas diversas, apresentando versatilidade, baixo custo, rapidez e sensibilidade comparáveis às das técnicas tradicionais.

Desse modo, o presente trabalho buscou desenvolver sensores fotoeletroquímicos de configuração simples baseados em TiO_2 para a determinação de DOP. Os fotoanodos, preparados empregando diferentes proporções de duas fases de TiO_2 (Anatase e Rutilo), apresentaram resultados satisfatórios. No Estudo 1, realizado com fotoanodos sem tratamento térmico, os resultados mostraram que sem tratamento térmico o FTO/TiO_2 sintetizado a partir da mistura das fases na proporção de 50% anatase/50% rutilo mostrou melhor desempenho por possuir aderência e resposta fotoeletroquímica, e que utilizado em meio de tampão Br mostrou-se promissor para análise de DOP. No Estudo 2, realizado com fotoanodos tratados termicamente, o FTO/TiO_2 100% anatase demonstrou melhor desempenho fotoeletroquímico, exibindo uma resposta fotoeletroquímica satisfatória para a determinação de DOP, evidenciada pelo aumento significativo da fotocorrente em comparação aos demais sistemas.

A otimização das condições experimentais garantiu ao sistema a obtenção de uma sensibilidade e LD satisfatórios, além de uma boa faixa linear de trabalho para a determinação do analito, sendo que os resultados obtidos foram muito próximos aos descritos na literatura, que em maioria utilizam sensores com uma configuração mais complexa, a partir da heterojunção ou dopagem com outros materiais além do TiO_2 .

Dessa forma, o sistema fotoeletroquímico baseado no FTO/TiO_2 mostrou-se promissor para o desenvolvimento de metodologias analíticas, apresentando um desempenho significativo no que se refere ao aumento de densidade de fotocorrente em resposta ao aumento da concentração de DOP, evidenciando a potencialidade de aplicação desses fotoanodos.

AGRADECIMENTOS

UNILAB, UFCA e FUNCAP (processos BPI: BP4-0172-00150.01.00/20 e BP5-0197-00017.01.00/22).

REFERÊNCIAS

BARD, A. J. Photoelectrochemistry. **Science**, v. 207, n. 4427, p. 139-144, 1980.

Brasil. **Farmacopeia Brasileira**, volume 2. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Brasília: Anvisa, 2010.

CAI, Z.; RONG, M.; ZHAO, T.; ZHAO, L.; WANG, Y.; CHEN, X. Solar-induced photoelectrochemical sensing for dopamine based on TiO_2 nanoparticles on $\text{g-C}_3\text{N}_4$ decorated graphene nanosheets. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 759, p. 32–37, 2015.

CARRERA, V.; SABATER, E.; VILANOVA, E.; SOGORB, M. A. A simple and rapid HPLC–MS method for the simultaneous determination of epinephrine, norepinephrine, dopamine and 5-hydroxytryptamine: Application to the secretion of bovine chromaffin cell cultures. **Journal of Chromatography B**, v. 847, n. 2, p. 88-94, 2007.

CHEN, X. SHEN, S.; GUO, L.; MAO, S. S. Semiconductor-based Photocatalytic Hydrogen Generation. **Chemical Reviews**, v. 110, n. 11, p. 6503-6570, 2010.

CHENG, W.; ZHENG Z.; YANG, J.; CHEN, M.; YAO, Q.; CHEN, Y.; GAO, W. The visible light-driven and self-powered photoelectrochemical biosensor for organophosphate pesticides detection based on nitrogen doped carbon quantum dots for the signal amplification. **Electrochimica Acta**, v. 296, p. 627 – 636, 2019.

DEVADOSS, A.; SUDHAGAR, P.; TERASHIMA, C.; NAKATA, K.; FUJISHIMA, A. Photoelectrochemical biosensors: New insights into promising photoelectrodes and signal amplification strategies. **Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews**, v. 24, p. 43-63, 2015.

FUJISHIMA, A.; HONDA, K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. **Nature**, v. 238, p. 37-38, 1972.

GRÄTZEL, M. Photoelectrochemical cells. **Nature**, v. 414, n. 6861, p. 338-344, 2001.

GAO, P. et al. Anatase TiO_2 based photoelectrochemical sensor for the sensitive determination of dopamine under visible light irradiation. **New Journal of Chemistry**, v.39, p. 1483-1487, 2015. Dispo

HUN, X.; WANG, S.; WANG, S.; ZHAO, J.; LUO, X. A photoelectrochemical sensor for ultrasensitive dopamine detection based on single-layer NanoMoS_2 modified gold electrode. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 249, p. 83–89, 2017.

LACERDA, V. P. B. **Estudo da influência do tratamento térmico na atividade fotocatalítica de semicondutores baseados nos óxidos de Titânio (IV) e Tungstênio (VI)**. 2018. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

LI, X.; YANG, Q.; HUA, H.; CHEN, L.; HE, X.; HU, C.; XI, Y. CdS/CdSe core/shell nanowall arrays for high sensitive photoelectrochemical sensors. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 630, p. 94-99, 2015.

LI, X. et al. Nanostructured photoelectrochemical biosensor for highly sensitive detection of organophosphorous pesticides. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 64, p. 1- 5, 2015.

LUPETTI, K. O.; RAMOS, L. A.; FATIBELLO-FILHO, O. Determinação enzimática de dopamina em formulações farmacêuticas utilizando sistema de análise por injeção em fluxo com extrato bruto de abacate (*Persea americana*). **Química Nova**, 26(2), 197-201, 2003.

MOCÁK, J.; BOND, M.; MITCHEL, S.; SCOLLARY, G.; **Pure And Applied Chemistry**, 69, 297, 1997.

- MOAKHAR, R. S.; GOH, G. K. L.; DOLATI, A.; GHORBANI, M. A novel screen-printed TiO_2 photoelectrochemical sensor for direct determination and reduction of hexavalent chromium. **Electrochemistry Communication**, v. 61, p. 110-113, 2015.
- MOAKHAR, R. S.; GOH, G. K. L.; DOLATI, A.; GHORBANI, M. Sunlight-driven photoelectrochemical sensor for direct determination of hexavalent chromium based on Au decorated rutile TiO_2 nanorods. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 201, p. 411-418, 2017.
- NETO, S. Y.; SILVA LUZ, R. C.; DAMOS, F. S. Photoelectroanalytical Sensor Based on TiO_2 Nanoparticles/ Copper Tetrasulfonated Phthalocyanine for Detection of Dopamine Exploiting Light Emitting Diode Irradiation. **Electroanalysis**, v. 28, p. 2087 – 2092, 2016.
- PENG, D.; LI, X.; ZHANG, L.; GONG, J. Novel visible-light-responsive photoelectrochemical sensor of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid using molecularly imprinted polymer/ BiOI nanoflake arrays. **Electrochemistry Communications**, v. 47, p. 9-12, 2014.
- QIN, C.; BAI, X.; ZHANG, Y.; GAO, K. Photoelectrochemical CdSe/TiO_2 nanotube array microsensor for high-resolution in-situ detection of dopamine. **Microchimica Acta.**, v. 185, n. 278, p. 1-8, 2018.
- RAO, M. C., RAVINDRANADH, K.; SHEKHAWAT, M. S. Structural and electrical properties of TiO_2 thin films. **Physical Review B**, v. 1728, p. 020077, 2016.
- REDDY, Y. A. K. et al. Oxygen partial pressure and thermal annealing dependent properties of RF magnetron sputtered TiO_2 - x films. **Materials Science in Semiconductor Processing**, v. 32, p. 107-116, 2015.
- SALEIRO, G. T.; CARDOSO, S. L.; TOLEDO, R.; HOLANDA, J. N. F. Avaliação das fases cristalinas de dióxido de titânio suportado em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 56, p.162-167, 2010.
- SANTOS, T. A. D. **Deteção fotoeletroanalítica de adrenalina baseada em DNA e nanopartículas de TiO_2 sensibilizadas com Bis (Etilenoditio) tetratiofulvaleno explorando luz de led.** 2017. 92 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2017.
- SANSIVIERO, M. T. C.; FARIA, D. L. A. Influência do tratamento térmico no nanocompósito fotocatalisador ZnO/TiO_2 . **Química Nova**, v. 38, n. 1, p. 55-59, 2015.
- SCHÖNING, M. J.; JACOBS, M.; MUCK, A.; KNOBBE, D. T.; WANG, J.; CHATRATHI, M.; SPILLMANN, S. Amperometric PDMS/glass capillary electrophoresis-based biosensor microchip for catechol and dopamine detection. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 108, n. 2, p. 688-694, 2005.
- SHEN, Q.; SHI, X.; FAN, M.; HAN, L.; WANG, L.; FAN, Q. Highly sensitive photoelectrochemical cysteine sensor based on reduced graphene oxide/ CdS:Mn nanocomposites. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 759, p. 61-66, 2015.
- SHEN, S.; CHEN, J.; WANG, M.; SHENG, X.; XIANGYAN, C.; FENG, X.; MAO, S.S. Titanium dioxide nanostructures for photoelectrochemical applications. *Progress in Materials Science*, v. 98, p. 299-385, 2018.
- SHI, H.; WANG, Y.; ZHAO, G. A highly selective and picomolar level photoelectrochemical sensor for PCB 101 detection in environmental water samples. **Biosensor and Bioelectronics**, v. 81, p. 503-509, 2016.

KHAN N. A. et al. Recent trends in disposal and treatment technologies of emerging- pollutants-A critical review. **TRAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 122, p. 115744, 2020.

SOUSA, K. A. P. **Fotossensor amperométrico à base de laranja de acridina/tio2 para a determinação de ácido clorogênico em amostras de alimentos**. 2018. 74 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

SPITLER, M. T. et.al. Practical challenges in the development of photoelectrochemical solar fuels production. **Sustain Energy Fuels**, v. 4, p. 985–995, 2020.

STOYTCHIEVA, M. Pesticides in the Modern World – Trends in Pesticides Analysis. Rijeka: InTech, 2011.

STANDAERT, D.; GALANTER, J. M. Farmacologia da neurotransmissão dopaminérgica. IN: GOLAN, D. E.; TASHJIAN, A. H.; ARMSTRONG, E. J.; ARMSTRONG, A. W. **Princípios de Farmacologia: A Base Fisiopatologia da Farmacoterapia**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, p. 166-185, 2009.

SU, Y.; CHEN, D.; YANG, S.; ZHANG, S.; LIU, Y.; FANG, Y.; ZHANG, Q.; PENG, F. Photoelectrochemical detection of ultra-trace fluorine ion using TiO₂ nanorod arrays as a probe. **RSC Advances**, v. 9, p. 26712-26717, 2019.

WANG, G.; XU, J.; CHEN, H. Progress in the studies of photoelectrochemical sensors. **Science in China Series B: Chemistry**, v. 52, n. 11, p. 1789-1800, 2009.

WANG, P.; DAI, W.; GE, L.; YAN, M.; GE, S.; YU, J. Visible light photoelectrochemical sensor based on Au nanoparticles and molecularly imprinted poly(o-phenylenediamine)-modified TiO₂ nanotubes for specific and sensitive detection chlorpyrifos. **Analyst**, v. 138, p. 939-945, 2013.

WANG, L. et al. A novel strategy for the construction of photoelectrochemical sensors based on quantum dots and electron acceptor: The case of dopamine detection. **Electrochemistry communication**, v. 41, p. 47-50, 2014.

WANG, H.; WANG, Y.; ZHANG, Y.; WANG, Q.; REN, X.; WU, D.; WEI, Q. Immunosensor for Detection of Carcinoembryonic Antigen Based on 2D TiO₂ Nanosheets and Carboxylated Graphitic Carbon Nitride. **Scientific Reports**, v. 6, p. 1 – 7, 2016.

WU, S.; HUANG, H.; SHANG, M.; DU, C.; WU, Y.; SONG, W. High visible light sensitive MoS₂ ultrathin nanosheets for photoelectrochemical biosensing. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 92, p. 646-653, 2017.

WU, S.; YANG, X.; ZHAO Y. Ru(II) Bipyridyl Complex and TiO₂ Nanocomposite Based Biomolecule-free Photoelectrochemical Sensor for Highly Selective Determination of Ultra-trace Hg²⁺ in Aqueous Systems. **Chemical Research Chinese Universities**, v. 35, n.3, p. 370-376, 2019.

YAN, Y.; LIU, Q.; DU, X.; QIAN, J.; MAO, H.; WANG, K. Visible light photoelectrochemical sensor for ultrasensitive determination of dopamine based on synergistic effect of graphene quantum dots and TiO₂ nanoparticles. **Analytica Chimica Acta**, v. 853, p. 258-264, 2015.

YAN, B.; ZHUANG, Y.; JIANG, Y.; XU, W.; CHEN, Y.; TU, J.; WANG, X.; WU, Q. Enhanced photoelectrochemical biosensing performance from rutile nanorod/anatase nanowire junction array. **Applied Surface Science**. v. 458, p. 382-388, 2018.

ZHANG, S. et al. TiO₂-B nanorod based competitive-like non-enzymatic photoelectrochemical sensing platform for noninvasive glucose detection. **Journal of Materials Chemistry B**, v. 3, p. 7554-7559, 2015.

ZHANG, Y.; XU, M.; GAO, P.; GAO, W.; BIAN, Z.; JIA, N. Photoelectrochemical sensing of dopamine using gold-TiO₂ nanocomposites and visible-light illumination. **Microchimica Acta**, v. 186, n. 326, p. 1-8, 2019.

ZHAO, Y.; ZHAO, S.; HUANG, J.; YE, F. Quantum dot-enhanced chemiluminescence detection for simultaneous determination of dopamine and epinephrine by capillary electrophoresis. **Talanta**, v. 85, n. 5, p. 2650-2654, 2011.

ZHAO, J.; ZHAO, L.; LAN, C.; ZHAO, S. Graphene quantum dots as effective probes for label-free fluorescence detection of dopamine. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 223, p. 246-251, 2016.

URUCUM NA INDÚSTRIA COSMÉTICA: POTENCIAIS TERAPÊUTICOS E ESTÉTICOS PARA CUIDADOS COM A PELE

Data de submissão: 11/12/2024

Data de aceite: 02/12/2024

Diego Rockenbach Dias

Departamento de Bioquímica e
Biotecnologia, Centro de Exatas,
Universidade Estadual de Londrina, PR –
Brasil.
<http://lattes.cnpq.br/4161544415892174>

Tainã de Oliveira Ferreira

Departamento de Bioquímica e
Biotecnologia, Centro de Exatas,
Universidade Estadual de Londrina, PR –
Brasil.
<http://lattes.cnpq.br/5606727829208112>

Niumaique Gonçalves da Silva

Departamento de Bioquímica e
Biotecnologia, Centro de Exatas,
Universidade Estadual de Londrina, PR –
Brasil.
<http://lattes.cnpq.br/4536326831124141>

Maria Antonia Pedrine Colabone Celligoi

Departamento de Bioquímica e
Biotecnologia, Centro de Exatas,
Universidade Estadual de Londrina, PR –
Brasil.
<http://lattes.cnpq.br/8103146519423861>

significativamente o crescimento da indústria cosmética nas últimas décadas. Nesse cenário, a biodiversidade florística dos biomas brasileiros, rica em espécies com características únicas, pode potencializar ainda mais o mercado de cosméticos e dermocosméticos. O urucum, popularmente conhecido, é uma planta originária da América do Sul e Central, com diversas espécies, e se destaca pela sua riqueza em carotenoides, como a bixina e a norbixina, que conferem uma coloração amarelo-avermelhada, além de compostos bioativos, como tocotrienóis e geranilgeraniol, com potenciais terapêuticos. Esses compostos oferecem efeitos benéficos e desempenham um papel fundamental na promoção da saúde e do bem-estar. A principal aplicação do urucum é na produção de colorífico e corantes naturais, amplamente utilizados nas indústrias alimentícia, têxtil e farmacêutica, entre outras. Sua versatilidade como ingrediente proporciona uma ampla gama de benefícios, sendo especialmente eficaz na indústria cosmética, graças às suas propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e fotoprotetoras. Essas qualidades atendem à crescente demanda dos consumidores por alternativas naturais, eficazes e sustentáveis. Assim, o urucum se

RESUMO: A crescente demanda por produtos multifuncionais tem impulsionado

posiciona como um ingrediente promissor na evolução da cosmética, unindo benefícios para a saúde e para o meio ambiente.

PALAVRAS-CHAVE: *Bixa orellana*, bixina, produtos naturais, dermocosmético.

ANNATTO IN THE COSMETIC INDUSTRY: THERAPEUTIC AND AESTHETIC POTENTIALS FOR SKIN CARE

ABSTRACT: The increasing demand for multifunctional products has significantly driven the growth of the cosmetic industry in recent decades. In this scenario, the floristic biodiversity of Brazilian biomes, rich in species with unique characteristics, can further enhance the cosmetics and dermocosmetics market. Annatto, popularly known, is a plant native to South and Central America, with several species, and stands out for its richness in carotenoids, such as bixin and norbixin, which give it a reddish-yellow color, in addition to bioactive compounds, such as tocotrienols and geranylgeraniol, with therapeutic potential. These compounds offer beneficial effects and play a key role in promoting health and well-being. The main application of annatto is in the production of natural colorific and dyes, widely used in the food, textile, and pharmaceutical industries, among others. Its versatility as an ingredient provides a wide range of benefits, being especially effective in the cosmetic industry, thanks to its antioxidant, anti-inflammatory and photoprotective properties. These qualities meet the growing consumer demand for natural, effective, and sustainable alternatives. Thus, annatto is positioned as a promising ingredient in the evolution of cosmetics, combining health and environmental benefits.

KEYWORDS: *Bixa orellana*, bixin, natural products, dermocosmetic.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por produtos multifuncionais tem impulsionado de forma significativa o crescimento da indústria cosmética nas últimas décadas. Esse avanço é fomentado por inovações tecnológicas, que possibilitam a criação de produtos que unem benefícios estéticos e terapêuticos. No cenário global, o setor alcançou US\$ 180,67 bilhões em 2024, com uma taxa de crescimento anual projetada de 6,60%, o que deverá resultar em um valor de mercado de US\$ 248,70 bilhões até 2029. No Brasil, as vendas de 2021 somaram R\$ 124,5 bilhões, solidificando o mercado de cosméticos e dermocosméticos como um dos mais promissores, com a expectativa de alcançar R\$ 130 bilhões até 2026 (Mendonça; Alves; Santos, 2023).

Diante deste cenário de crescimento, a biodiversidade florística dos biomas brasileiros, que abriga uma ampla variedade de espécies com características únicas, pode impulsionar ainda mais o mercado de cosméticos e dermocosméticos. Essas plantas, cujas propriedades variam de atividades antioxidantes a efeitos antimicrobianos, têm despertado um interesse crescente no setor, sendo constantemente exploradas no desenvolvimento de produtos inovadores, naturais e sustentáveis (Herculano, 2013; Pinto, 2013). Entre as diversas espécies presentes nos biomas brasileiros, o urucum, popularmente conhecido,

se destaca pela sua riqueza em carotenoides, como bixina e norbixina, que conferem a coloração amarela-avermelhada, além de compostos bioativos, como tocotrienóis e geranilgeraniol, encontrados nas sementes do urucuzeiro (Soares; Leite; Araújo, 2021).

Embora existam várias espécies de urucum, *Bixa orellana* é a mais conhecida e cultivada. Nativa da América Tropical, essa planta destaca-se pela sua importância econômica, com o Brasil figurando entre os maiores produtores e exportadores mundiais. Os extratos de urucum estão disponíveis em diversas formas no mercado, como pó, pasta, óleo e pedaços, o que possibilita uma ampla gama de aplicações industriais (Franco et al., 2002; Sathiyala Mala et al., 2013; Soares; Leite; Araújo, 2021).

Em relação à segurança alimentar, o urucum é amplamente reconhecido e aprovado por órgãos reguladores internacionais, como a Food and Drug Administration (FDA) e a European Food Safety Authority (EFSA), além de contar com a aprovação da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa) no Brasil. Sua utilização e coloração variam de acordo com as tradições alimentares e culturais de cada país, refletindo sua grande versatilidade (Giuliano; Rosati; Bramley., 2003; Sathiyala Mala et al., 2013; Hirko; Getu, 2022).

A principal aplicação do urucum é na produção de corante (conhecido como colorau) e corantes naturais, usados amplamente nas indústrias alimentícia, cosmética, têxtil, farmacêutica, de perfumaria e de tintas. Além disso, a extração de lipídios, geranilgeraniol e tocotrienol a partir do urucum tem se mostrado de grande importância nas áreas farmacêutica e médica, ampliando ainda mais suas aplicações (Sathiyala Mala et al., 2013; Soares; Leite; Araújo, 2021). Esses diversos usos ilustram a versatilidade do urucum, que, como ingrediente, oferece uma ampla gama de benefícios e é eficaz em uma grande variedade de produtos, especialmente na indústria cosmética.

CARACTERÍSTICA VEGETAL E BIOLÓGICA DO URUCUM

O urucuzeiro é uma planta originária da América do Sul e Central, pertencente à família *Bixaceae* e ao gênero *Bixa*, com a espécie *B. orellana* sendo a mais abundante. Existe uma ampla diversidade genética dentro do urucum, com variedades populares que recebem denominações como “focinho de rato”, “cabeça de moleque”, “peruana”, “bico de pato”, “amarela”, “Wagner”, “Piave”, entre outras. Essas variedades se distinguem por características como o porte da planta, o período de produção, a forma e as cores dos frutos, além do teor de pigmentos e da produtividade (Ramalho et al., 1987; Fabri; Teramoto, 2015).

O urucum pode atingir de 2 a 4 metros de altura, sendo classificado como um arbusto ou arvoreta, com ramificações esgalhadas e densas. Seu caule é coberto por uma casca rugosa e fina, de coloração cinza-esverdeada. As folhas são simples e alternadas, com pecíolos longos e lâminas de forma lato-ovada. A inflorescência ocorre em panículas

terminais, e as flores apresentam características hermafroditas, actinomorfas, diclamídeas e dialipétalas. Os frutos são cápsulas ovaladas, conhecidas como cachopas, recobertas por espinhos flexíveis. Dentro dessas cápsulas, encontram-se várias sementes envoltas por um arilo resinoso que recobre sua superfície externa, contendo diversas substâncias, das quais são extraídos os pigmentos. O principal pigmento, de coloração vermelha, é a bixina, que corresponde a cerca de 80% dos carotenoides totais (Franco et al., 2002; Carreira et al. 2022). Além da bixina, outros carotenoides também podem ser identificados, como isobixina, beta-caroteno, criptoxantina, luteína, zeaxantina e orelina (Anselmo; Mata; Rodrigues, 2008; Tonani, 2000).

Vale ressaltar que a composição da semente pode variar conforme a variedade analisada. O arilo geralmente representa entre 5% e 10% do peso total da semente, com cerca de 30% desse peso sendo composto pelo carotenoide bixina. Os 70% restantes são formados por cinzas (2,0%), proteínas (2,5%), lipídeos (30%), carboidratos (32%) e umidade (3,5%). Em comparação, a semente sem o arilo apresenta uma composição de 9,8% de umidade, 4,6% de cinzas, 10,8% de proteínas, 4,8% de lipídeos e 70% de carboidratos (Carvalho et al., 1991).

Os extratos de urucum apresentam ampla aplicação na medicina tradicional, sendo reconhecidos por suas propriedades antimicrobianas, anti-hemorrágicas, expectorantes e, quando preparados na forma de xarope, utilizados em gargarejos (Irobi et al., 1996; Rojas et al., 2006). Além disso, são empregados como laxativos, agentes estomáticos, cicatrizantes e no tratamento de problemas dermatológicos (Hirko et al., 2022). Historicamente, as diferentes partes da planta de urucum têm sido utilizadas para diversos fins (**Tabela 1**), devido ao seu potencial antioxidante, fotoprotetor e anti-inflamatório (Costa et al., 2013).

Outros estudos ressaltam a ação antimicrobiana eficaz do óleo de urucum contra uma variedade de patógenos, incluindo bactérias como *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*. Os mecanismos responsáveis por essa ação envolvem a alteração das membranas celulares dos microrganismos, o que leva à sua morte. Essa atividade antimicrobiana é atribuída à presença dos compostos bioativos tocotrienol e geranilgeraniol, que aumentam a permeabilidade das membranas celulares, interrompendo suas funções vitais (Majolo et al., 2013; Barbosa et al., 2019; Silva Junior, 2023). São exemplos que demonstram como os efeitos benéficos resultam da presença de compostos bioativos, cujas propriedades desempenham um papel significativo na promoção da saúde e do bem-estar.

MORFOLOGIA VEGETAL	APLICAÇÕES MEDICINAIS E TERAPÊUTICAS	AUTOR
Semente	Adstringente, antitérmico, afrodisíaco, antídoto para picadas de cobra, corante aromático e alimentar, diabetes, disenteria, estômago, laxantes, pintura corporal, queimaduras e malária.	Brandao et al., 1992; Hirschmann et al., 1990; Lentz et al., 1991; Morrison et al., 1985; Ramirez et al., 1988; Venugopalan et al., 2011.
Folha	Antitérmico, dor, digestivo, disenteria, gonorreia, hepatite e problemas de pele.	Duke et al., 1994; Lentz et al., 1991; Lentz et al., 1998; Venugopalan et al., 2011.
Raiz	Doenças do sangue, diabetes, hepatite alcoólica e vermes.	Duke et al., 1994; Giron et al., 1991; Villar et al., 1997.

Tabela 1: Aplicações das diferentes partes da planta de urucum na medicina

Fonte: Adaptado de Hirko et al., 2022.

PROPRIEDADES DOS COMPOSTOS BIOATIVOS DO URUCUM PARA A PELE

Dentre os principais compostos químicos presentes no urucum, destacam-se os carotenoides, especialmente a bixina e a norbixina, além de outros compostos, como o tocotrienol e o geranilgeraniol, que desempenham um papel fundamental na manutenção e proteção da saúde da pele (Ferreira, 2018). A bixina (**Figura 1**), um carotenoide apolar, é o principal composto presente nas sementes de urucum e é responsável pela sua coloração vermelha característica. Este composto possui uma potente capacidade antioxidante, ajudando a proteger as células da pele contra danos causados pelos radicais livres. Os radicais livres são moléculas instáveis que aceleram o envelhecimento da pele, provocando rugas e outros sinais de degradação cutânea. Por essa razão, a bixina tem atraído a atenção da indústria cosmética, especialmente por sua potencialidade em retardar o envelhecimento cutâneo e preservar a integridade da pele (Pinzón-García et al., 2017; Ferreira, 2018).

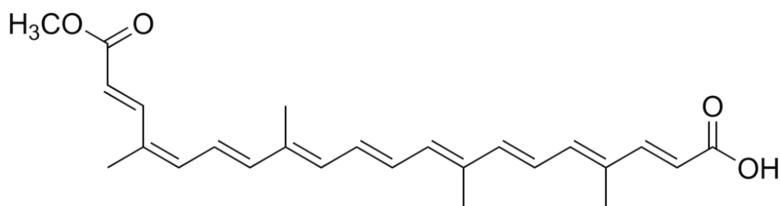


Figura 1: Representação estrutural molecular da bixina.

Fonte: Adaptado de Tocchini; Mercadante (2001).

Por outro lado, a norbixina (**Figura 2**), um carotenoide polar encontrado no urucum, também apresenta propriedades antioxidantes significativas. Ao contrário da bixina, a norbixina apresenta maior solubilidade em água, o que amplia suas possibilidades de

aplicação, especialmente em produtos aquosos ou em formulações que exigem uma maior interação com líquidos. A combinação de bixina e norbixina cria uma sinergia única no combate ao estresse oxidativo, tornando esse composto um ingrediente altamente versátil e eficaz. Além disso, a norbixina atua como um filtro natural contra a radiação ultravioleta (UV), absorvendo parte da radiação e protegendo a pele dos danos solares. Isso ajuda a reduzir a formação de eritema e queimaduras solares, além de diminuir, a longo prazo, o risco de desenvolvimento de câncer de pele. Suas propriedades antioxidantes também podem ser exploradas para proteger a pele contra danos ambientais, como a poluição (Pinzón-García et al., 2017; Santos et al., 2023).

Figura 2: Representação estrutural da molécula de norbixina.

Outro composto bioativo relevante presente no urucum é o tocotrienol (**Figura 3**), um membro da família da vitamina E com propriedades relevantes. Este composto se destaca por suas propriedades antioxidantes, superiores às de outras formas de vitamina E, devido à sua estrutura química, que favorece uma maior fluidez nas membranas celulares. O tocotrienol protege as células da pele contra os danos causados pelos raios UV, além de melhorar a hidratação e a elasticidade da pele. Atua na prevenção de danos oxidativos provocados pelos radicais livres e contribui na manutenção de integridade celular, favorecendo o processo de cicatrização da pele ao estimular a produção de colágeno e elastina (Zou; Akoh, 2015; Soares; Leite; Araújo, 2021). Sua capacidade de restaurar a barreira lipídica da pele ajuda a prevenir a perda excessiva de água transepidérmica, mantendo a pele hidratada por mais tempo. Esse efeito é particularmente benéfico para peles secas ou envelhecidas, que tendem a perder umidade com mais facilidade (Pires, 2018; Soares; Leite; Araújo, 2021).

Figura 3: Representação estrutural da molécula de tocotrienol

antimicrobianas. Esse composto ajuda a aliviar inflamações e reduzir a vermelhidão, sendo eficaz no cuidado da pele irritada ou sensibilizada. Pesquisas indicam que o geranilgeraniol atua na modulação da resposta inflamatória, diminuindo a produção de mediadores inflamatórios como TNF- α e IL-6, o que favorece um processo de cicatrização mais rápido e menos doloroso. Além disso, sua ação antimicrobiana contribui para a prevenção de infecções na área lesionada, promovendo uma cicatrização mais eficaz (Moraes-Neto et al., 2020; Saputra et al., 2021).

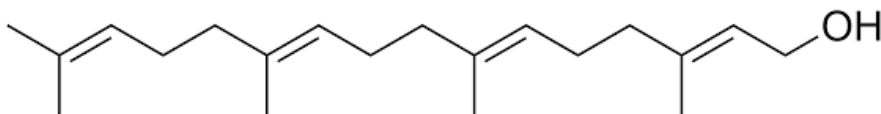


Figura 5 - Representação estrutural da molécula de geranilgeraniol.

Fonte: Adaptado de Costa; Chaves (2005).

Assim, a presença de compostos bioativos como bixina, norbixina, tocotrienol e geranilgeraniol torna o urucum uma rica fonte de ativos com grande potencial para aplicações inovadoras, além de despertar um crescente interesse pelo uso de seus compostos funcionais em diversos produtos de cuidado pessoal (Giriwono et al., 2013; Metz et al., 2023).

APLICAÇÕES COSMÉTICAS DO URUCUM

Devido às propriedades únicas e versáteis dos compostos bioativos presentes no urucum, o extrato oleoso dessa planta tem ganhado cada vez mais destaque na indústria cosmética. Originários de uma fonte natural e renovável, os bioativos do urucum se destacam por suas qualidades excepcionais, como promover hidratação profunda, conferir brilho e proteger a pele contra danos causados por fatores ambientais, como poluição e radiação solar (Wong; Radhakrishnan, 2012; Johnson et al., 2021; Silva Junior, 2023; Guia Óleo, 2024)

Na indústria cosmética, as aplicações do urucum são vastas e abrangem uma ampla gama de produtos, que vão desde itens para cuidados diários até tratamentos específicos. Em cremes hidratantes, o extrato de urucum atua como uma potente barreira protetora, ajudando a reter a umidade na pele e funcionando como um eficaz agente emoliente, o que proporciona maciez e suavidade. Nos protetores solares, seus carotenoides, atuam como filtros solares naturais, absorvendo e dissipando a radiação ultravioleta, potencializando a proteção contra os danos causados pelos raios UV e prevenindo o envelhecimento precoce da pele (Morais et al., 2008; Pinzón-García et al., 2016; Pacheco et al., 2019; Metz et al., 2023; Mutmainah et al., 2020; Santos et al., 2023; Guia Óleo, 2024).

Além disso, em produtos antienvelhecimento, os compostos bioativos do urucum desempenham um papel fundamental na regeneração celular, promovendo a produção de

colágeno e elastina, que são essenciais para manter a firmeza, elasticidade e a juventude da pele. Nas maquiagens, o urucum é amplamente valorizado por conferir cores vibrantes, suaves e naturais, com excelente durabilidade, sendo especialmente popular em produtos que buscam resultados de longa duração e acabamento impecável (Moraes et al., 2008; Vilar et al., 2014; Afonso et al., 2019; Soares; Leite; Araújo, 2021; Guia Óleo, 2024).

O urucum também tem se mostrado altamente eficaz em produtos capilares, oferecendo benefícios tanto para os fios quanto para o couro cabeludo. Nos cosméticos para cabelo, o extrato de urucum ajuda a nutrir e revitalizar os fios, proporcionando brilho intenso e suavidade. Além disso, ele tem propriedades calmantes que tratam o couro cabeludo, prevenindo problemas como irritações, caspa e ressecamento. Sua ação hidratante e antioxidante também contribui para a proteção contra os danos ambientais, mantendo os cabelos saudáveis e com aparência vibrante (Shahi; Khajeh Mehrizi; Hadizadeh, 2017; Ntohogian, 2018; Soares; Leite; Araújo, 2021; Guia Óleo, 2024).

Em resumo, o urucum se consolida como um ingrediente multifuncional e altamente eficaz na indústria cosmética, trazendo uma combinação única de benefícios estéticos e terapêuticos, que atendem às crescentes demandas dos consumidores por produtos naturais, sustentáveis e de alto desempenho.

O URUCUM COMO SOLUÇÃO NATURAL E SUSTENTÁVEL NA INDÚSTRIA COSMÉTICA

Na indústria cosmética, a composição química do urucum confere-lhe a capacidade de estabilizar diferentes formulações, tornando-o um ingrediente multifuncional tanto para produtos à base de óleo quanto de água. Suas propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e fotoprotetoras atendem à crescente demanda por alternativas naturais, eficazes e sustentáveis (Soares; Leite; Araújo, 2021; Nair et al., 2022).

O cultivo do urucum para uso industrial é reconhecido por sua sustentabilidade, uma vez que a planta é cultivada em sistemas agroflorestais e em contextos de agricultura familiar. Seu cultivo requer poucas intervenções, como fertilizantes ou pesticidas. O processo de extração dos compostos bioativos é simples e pode ser realizado utilizando solventes não tóxicos, como etanol, ou por extrações aquosas com hidróxido de sódio. Uma alternativa moderna e segura é a extração supercrítica, que não utiliza solventes orgânicos ou produtos químicos, aumentando a segurança do processo. Além disso, estudos indicam que os resíduos dessa extração podem ser aproveitados como adubo ou fonte de fibras alimentares, fechando o ciclo produtivo de maneira ecologicamente responsável (Silva; Mercadante, 2002; Cárdenas-Toro, 2024).

Dessa forma, a combinação dos benefícios funcionais do urucum em cosméticos e dermocosméticos multifuncionais torna-o um ingrediente essencial em produtos que promovem a saúde e a estética da pele de forma sustentável (Nair et al., 2022; Franklin et al.,

2023). Além de ser uma escolha ecologicamente responsável, a incorporação dos bioativos do urucum em formulações cosméticas garante que suas propriedades permaneçam eficazes por longos períodos, assegurando a durabilidade dos produtos. Isso facilita a utilização do urucum em uma ampla variedade de formulações, como loções, cremes e protetores solares, ampliando suas aplicações. Assim, os compostos bioativos do urucum se destacam como um recurso valioso na criação de cosméticos e dermocosméticos (Volp et al., 2011; Ghazali, 2022; Guia Óleo, 2024).

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

O crescente interesse por cosméticos naturais e sustentáveis tem potencial para impulsionar ainda mais a inclusão do urucum em novas formulações, ao mesmo tempo em que sensibiliza os consumidores sobre a importância de escolhas eco-friendly. O urucum se destaca na indústria cosmética por suas propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e fotoprotetoras. Além disso, é uma excelente alternativa para a criação de produtos de baixo impacto ambiental. Seu cultivo, realizado em sistemas agroflorestais e na agricultura familiar, requer menos insumos químicos e permite maior aproveitamento dos resíduos gerados, contribuindo para a redução dos impactos ambientais. Assim, o urucum se posiciona como um ingrediente essencial na evolução da cosmética, unindo benefícios para a saúde e para o meio ambiente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES - Brasil), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a empresa Adeeste.

REFERÊNCIAS

- AFONSO, C. R., HIRANO, R. S., GASPAR, A. L., CHAGAS, E. G. L., CARVALHO, R. A., SILVA, F. V., LEONARDI, G. R., LOPES, P. S., SILVA, C. F., & YOSHIDA, C. M. P. Biodegradable antioxidant chitosan films useful as an anti-aging skin mask. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 132, p. 1262–1273, 2019.
- ANSELMO, G. C. S.; MATA, M. E. M. R. C.; RODRIGUES, E. Comportamento Higroscópico do Extrato seco de Urucum (*Bixa orellana* L). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 6, p. 1888-1892, 2008.
- BARBOSA, A. L. P.; WENZEL-STORJOHANN, A.; BARBOSA, J. D.; ZIDORN, C.; PEIFER, C.; TAŞDEMİR, D.; ÇIÇEK, S. Antimicrobial and cytotoxic effects of the Copaifera reticulata oleoresin and its main diterpene acids. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 233, p. 94-100, 2019.
- BRANDAO, M. G. L. GRANDI, T. S. M., ROCHA, E. M. M. SAWYER, D. R. AND KRETTLI, A. U. Survey of medicinal plants used as antimalarials in the Amazon, **Journal of Ethnopharmacology**, v. 36(2) p. 175–182, 1992.

- CÁRDENAS-TORO, F.P.; MEZA-COAQUIRA, J.H.; NAKAMA-HOKAMURA, G.K.; ZABOT, G.L. Obtaining Bixin- and Tocotrienol-Rich Extracts from Peruvian Annatto Seeds Using Supercritical CO₂ Extraction: Experimental and Economic Evaluation. **Foods**, v. 13, p. 1549, 2024.
- CARREIRA, L. M. M.; SILVA, E. F.; CASCAES, M. M.; NASCIMENTO, L. D.; ANDRADE, E. H. A.; POLTRONIERI, M. C. *Bixa orellana*: Urucum. In: CORADIN, L.; CAMILLO, J.; VIEIRA, I. C. G. (ed.). **Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro: região Norte**. Brasília, DF: MMA, p. 709-718, 2022. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1144587>>. Acesso em 28. Nov. 2024.
- CARVALHO, P.R.N.; CARVALHO, C.R.L.; MANTOVANI, D.M.B. Estudo da composição de sementes, cachopas, folhas e galhos do urucueiro. In: Seminário Internacional de Corantes Naturais para Alimento, 2., 1991, Campinas. **Resumos do Seminário Internacional de Corantes Naturais para Alimentos**. Campinas: ITAL, 1991.
- COSTA, C. K.; SILVA, C. B.; LORDELLO, A. L. L.; ZANIN, S. M. W.; DIAS, J. F. G.; MIGUEL, M. D.; MIGUEL, O. G. Identificação de δ tocotrienol e de ácidos graxos no óleo fixo de urucum (*Bixa orellana* Linné). **Revista Brasileira de Plantas Medicas**, v.15, n.4, p.508-512, 2013.
- COSTA, C. L. S.; CHAVES, M. H. Extração de pigmentos das sementes de *Bixa orellana* L.: uma alternativa para disciplinas experimentais de química orgânica. **Quim. Nova**, v. 28, n. 1, p. 149-152, 2005.
- DUKE, J. A AND MARTINEZ, R. V. Amazonian Ethnobotanical Dictionary, CRC Press, Boca Raton, Fla, USA, 1994.
- FABRI, E. G.; TERAMOTO, J. R. S. Urucum: fonte de corantes naturais. **Hortic. Bras.** v. 33, 2015.
- FERREIRA, M. A. Carreadores lipídicos nanoestruturados contendo óleo de urucum (*Bixa orellana* L.): uma alternativa para o tratamento da leishmaniose cutânea. p. 24-26, 2018. **Dissertação** (Mestrado em Ciências Farmacêuticas), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil, 2018.
- FRANCO, C. F. O.; SILVA, F. C.; FILHO, J. C.; NETO, M. B.; SÃO JOSÉ, A. R.; REBOUÇAS, T. N. H.; FONTINELLI, I. E. C. Urucuzeiro agronegócios de corantes naturais. João Pessoa: **EMEPA-PB**, 2002. 120 p.
- FRANKLIN V.A.; BACH HI, E.M.; WADT, N.S.Y.; BACH, E.E. Aqueous extract from urucum (*Bixa orellana* L.): antimicrobial, antioxidant, and healing activity. **Porto Biomedical Journal**, v. 8(1), p. 183, 2023.
- GHAZALI, N.I.; MOHD RAIS, R.Z.; MAKPOL, S.; CHIN, K.Y.; YAP, W.N.; GOON, J.A. Effects of tocotrienol on aging skin: A systematic review. **Front. Pharmacol.** v.13, 2022.
- GIRIWONO, P.E.; SHIRAKAWA, H.; OHSAKI, Y.; HATA, S.; KURIYAMA, H.; SATO, S.; GOTO, T.; KOMAI, M. Dietary supplementation with geranylgeraniol suppresses lipopolysaccharide-induced inflammation via inhibition of nuclear factor- κ B activation in rats. **Eur J Nutr**, v. 52(3), p. 1191-1199, 2013.
- GIRON, L. M., FREIRE, V., ALONZO, A.; CACERES, A. Ethnobotanical survey of the medicinal flora used by the Caribs of Guatemala. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 34(2-3), p. 173–187, 1991.
- GIULIANO, G., ROSATI, C., & BRAMLEY, P. M. To dye or not to dye: biochemistry of annatto unveiled. **Trends in Biotechnology**, v. 21(12), p. 513-516, 2003.

GUIA ÓLEO. **Benefícios e Aplicações do Extrato Oleoso de Urucum na Cosmética e Saúde**, 13. Jul. 2024. Disponível em < <https://www.guiaoleo.com.br/blog/categorias/artigos/beneficios-e-aplicacoes-do-extrato-oleoso-de-urucum-na-cosmetica-e-saude>>. Acesso em 28. Nov. 2024.

HERCULANO, F. E. B. Produção industrial de cosméticos: O protagonismo da biodiversidade vegetal da Amazônia. 2013. 145 f. **Tese** (Doutorado em biotecnologia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2013.

HIRKO, B.; GETU, A. *Bixa Orellana* (Annatto Bixa): A Review on Use, Structure, Extraction Methods and Analysis. **Agron Technol Eng Manag**, v. 5(1), p. 687-696, 2022.

HIRSCHMANN, G. S. AND DE ARIAS, A. R. A survey of medicinal plants of minas gerais, Brazil. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 29(2), p. 159–172. 1990.

IROBI, O.N.; MOO-YOUNG, M.; ANDERSON, W.A. Antimicrobial activity of annatto (*Bixa orellana* L.) extract. **Pharmaceutical Biology**, v. 34, n. 2, p. 87-90, 1996.

JOHNSON, N. C.; OGBAMGBA, V. M.; MBACHANTIM, J. T. Anti-Aging Potentials of Tocotrienol. **European Journal of Science, Innovation and Technology**, v. 1, n. 6, 2021.

LENTZ, D. L. Medicinal and other economic plants of the Paya of Honduras. **Economic Botany**, v. 47(4), p. 358–370, 1991.

LENTZ, D. L., CLARK, A. M., HUFFORD C. D. Antimicrobial properties of Honduran medicinal plants. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 63(3), p. 253–263, 1998.

MAJOLO, C.; CARVALHO, H. H.; WIEST, J. M. Atividade antibacteriana “*in vitro*” de diferentes acessos de urucum (*Bixa orellana* L.) e sua relação com o teor de bixina presente nas sementes. **B.CEPPA**, v. 31, p. 115-124, 2013.

MENDONÇA, B. M. R.; ALVES, P. E.; SANTOS E. P. Cosméticos Verdes: revisão bibliográfica acerca da tendência sustentável no desenvolvimento de cosméticos. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 2, 2023.

METZ, S. K. G.; PEREIRA, V. T.; SCALCON, A.; SAIBERT, C. L. Proposta de formulação de suplemento alimentar composto por tocotrienol. **Brazilian Journal of Health Review**, v. 6, n. 3, p. 11467–11480, 2023.

MORAES-NETO, R. N.; COUTINHO, G. G.; ATAÍDE, A. C. S.; REZENDE, A. O.; NASCIMENTO, C. E. C.; ALBUQUERQUE, R. P.; ROCHA, C. Q.; RÊGO, A. S.; CARTÁGENES, M. S. S.; ABREU-SILVA, A. L. SANTOS, I. V. F.; SANTOS, C. B. R.; GUERRA, R. N. M.; RIBEIRO, R. M.; MONTEIRO-NETO, V.; SOUSA, E. M.; CARVALHO, R. C. Ethyl Acetate Fraction of *Bixa orellana* and Its Component Ellagic Acid Exert Antibacterial and Anti-Inflammatory Properties against *Mycobacterium abscessus* subsp. *massiliense*. **Antibiotics**, v. 11, p. 817, 2022.

MORAIS, G. G.; SANTOS, O. D. H.; OLIVEIRA, W.P.; FILHO, P. A. R. Obtenção de emulsões O/A contendo cristal líquido de óleo de urucum (*Bixa orellana*), óleo de café e óleo da árvore do chá (*Melaleuca alternifolia*) como fase oleosa usando sistema HLB e diagrama de fase ternário. **Journal of Dispersion Science and Technology**, v. 29 (2), p. 297–306, 2008.

MORRISON, E. Y., AND WEST, M. E. The effect of Bixa Orellana (Annatto) on blood sugar levels in the anaesthetized dog. **West Indian Medical Journal**, v. 34(1), p. 38–42, 1985.

- MUTMAINAH; FRANYOTO, Y.D.; PUSPITANINGRUM, I.; KUSMITA, L. Sunscreen activity on fruit skin extract of Annatto (*Bixa orellana* L.) in vitro. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 13(45), p. 4506-4512, 2020.
- NAIR, A.B.; GORAIN, B.; PANDEY, M.; JACOB, S.; SHINU, P.; ALDHUBIAB, B.; ALMUQBIL, R.M.; ELSEWEDY, H.S.; MORSY, M.A. Tocotrienol in the Treatment of Topical Wounds: Recent Updates. **Pharmaceutics**, v. 14, p. 2479, 2022.
- NAKATOMI, T.; ITAYA-TAKAHASHI, M.; HORIKOSHI, Y.; SHIMIZU, N.; PARIDA, I. S.; JUTANOM, M.; EITSUKA, T.; TANAKA, Y.; ZINGG, J. M.; MATSURA, T.; NAKAGAWA, K. The difference in the cellular uptake of tocopherol and tocotrienol is influenced by their affinities to albumin. **Sci Rep**, v. 13, p. 7392, 2023.
- NTOHOGLIAN, S.; GAVRILIADOU, V.; CHRISTODOULOU, E.; NANAKI, S.; LYKIDOU, S.; NAIDIS, P.; MISCHOPOULOU, L.; BARMPALEXIS, P.; NIKOLAIDIS, N.; BIKIARIS, D.N. Chitosan Nanoparticles with Encapsulated Natural and UF-Purified Annatto and Saffron for the Preparation of UV Protective Cosmetic Emulsions. **Molecules**, v. 23, 2018.
- PACHECO S. D. G.; GASPARIN A. T.; JESUS C. H. A.; SOTOMAIOR B. B.; VENTURA A. C. S. S. B.; REDIVO D. D. B.; CABRINI D. A.; GASPARI DIAS J. F.; MIGUEL M. D.; MIGUEL O.G.; DA CUNHA J.M. Antinociceptive and AntiInflammatory Effects of Bixin, a Carotenoid Extracted from the Seeds of *Bixa orellana*. **Planta Med**, v. 85(16), p. 1216-1224, 2019.
- PINTO, M. R. Utilização de materiais de origem em produtos farmacêuticos e cosméticos de aplicação cutânea. 2013. 42 f. **Dissertação** (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Saúde, Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa, 2013.
- PINZÓN-GARCÍA, A.D.; CASSINI-VIEIRA, P.; RIBEIRO C.C.; DE MATOS JENSEN C.E.; BARCELOS L.S.; CORTES M.E.; SINISTERRA R.D. Efficient cutaneous wound healing using bixin-loaded PCL nanofibers in diabetic mice. **Journal of biomedical materials research. Part B: Applied biomaterials**, v. 105, n. 7, p. 1938–1949, 2016.
- PIRES, M. G. Enriquecimento de norbixina por processos físico-químicos a partir de bixina de sementes de urucum (*Bixa orellana* L.) e avaliação da atividade antioxidante e antibacteriana in vitro. **Dissertação** (Mestrado em Ciências). Universidade de São Paulo, 2018.
- RAMALHO, R. S.; PINHEIRO, A. L.; DINIZ, G.S. Informações básicas sobre a cultura e utilização do urucum (*Bixa orellana* L.). **Informe Técnico**, n. 58. UFV, Viçosa, 1987.
- RAMIREZ, V.R., MOSTACERO, L.J., GARCIA, A.E., MEJIA, C.F., PELAEZ, P.F., MEDINA, C.D. AND MIRANDA, C.H. Vegetales empleados en medicina tradicional Norperuana. **Banco Agrario del Peru & NACL Univ Trujillo**, Peru, 1988.
- ROJAS, J.; OCHOA, V.J.; OCAMPO, S.A.; MUNÓZ, J.F. Screening for antimicrobial activity of ten medicinal plants used in Colombian folkloric medicine: A possible alternative in the treatment of non-nosocomial infections. **Complementary and Alternative Medicine**. v.6:2, 2006.
- SANTOS, A. M. Bioativos naturais como fator de proteção ultravioleta para tecidos de algodão: uma alternativa promissora e sustentável de proteção natural. **Tese** (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal da Paraíba, 2023.

SAPUTRA, W. D.; SHONO, H.; OHSAKI, Y.; SULTANA, H.; KOMAI, M.; SHIRAKAWA, H. Geranylgeraniol Inhibits Lipopolysaccharide-Induced Inflammation in Mouse-Derived MG6 Microglial Cells via NF- κ B Signaling Modulation. **Int. J. Mol. Sci.** v. 22, 2021.

SATHIYA MALA K, PRABHAKARA RAO P, PRABHAVATHY MB, SATYANARAYANA A. Studies on application of annatto (*Bixa orellana* L.) dye formulations in dairy products. **J Food Sci Technol**, v.52(2), p. 912-219, 2015.

SHAHI, Z.; KHAJEH MEHRIZI, M.; HADIZADEH, M. A Review of the Natural Resources Used to Hair Color and Hair Care Products. **Journal of Pharmaceutical Sciences and Research**, v. 9, p. 1026-1030, 2017.

SILVA JUNIOR, J. P. P.; NOBRE, J. C. N.; GOMES W. R.; FREITAS, A. D. G. Avaliação in Vitro do Potencial Antimicrobiano de Extratos do Urucum (*Bixa orellana* L.). **Uniciencias**, v.27, n.2, 2023.

SILVA, E. M.; MERCADANTE, A. Z. Caracterização de bixina, norbixina e outros carotenoides de urucum. **Química Nova**, v. 25(6), p. 1040-1044, 2002.

SOARES, L. F. F.; LEITE, A. G.; ARAÚJO, K. S. Potencial terapêutico de compostos de urucum (*Bixa orellana* L.) no reparo de tecidos. **Brazilian Journal of Surgery & Clinical Research**, v. 36, n. 2, 2021.

TOCCHINI, L., MERCADANTE, A. Extração e determinação, por CLAE, de bixina e norbixina em coloríficos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 21, 2001.

TONANI, F. L. Avaliação nutricional do resíduo de urucum (*Bixa orellana* L.), após a extração do corante. **ARS Veterinária**, v. 16, n. 2, p. 118-121, 2000.

VENUGOPALAN, P. A. GIRIDHAR, G. A.; RAVISHANKAR, A. G. Food, Ethanobotanical and diversified applications of *Bixa orellana* L.: a scope for its improvement through biotechnological mediation. **Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences**, v. 1, p. 9–31, 2011.

VILAR, D. DE A., VILAR, M. S. DE A., MOURA, T. F. A. DE L. E, RAFFIN, F. N., OLIVEIRA, M. R. DE, FRANCO, C. F. DE O., DE ATHAYDE-FILHO, P. F., DINIZ, M. DE F. F. M., & BARBOSA-FILHO, J. M. Traditional Uses, Chemical Constituents, and Biological Activities of *Bixa orellana* L.: A Review. **The Scientific World Journal**, p. 1–11, 2014.

VILLAR, R.; CALLEJA, J. M.; MORALES, C.; CACERES, A. Screening of 17 Guatemalan medicinal plants for platelet antiaggregant activity. **Phytotherapy Research**, v. 11, p. 441–445, 1997.

VOLP, A. C. P.; RENHE, I. R. T.; STRINGUETA, P. C. Carotenoides: pigmentos naturais como compostos bioativos. **Revista Brasileira de Nutrição Clínica**, v. 26, n. 4, p. 291-298, 2011.

WONG, R. S. Y.; RADHAKRISHNAN, A. K. Tocotrienol research: past into present. **Nutrition Reviews**, v. 70, p. 483–490, 2012.

ZOU, L.; AKOH, C. C. Antioxidant activities of annatto and palm tocotrienol rich fractions in fish oil and structured lipid-based infant formula emulsion. **Food Chemistry**, v. 168, p. 504–511, 2015.

NANOEMULSIONES: UN ENFOQUE HACIA EL USO DE EMULSIFICANTES DE ORIGEN NATURAL

Data de submissão: 06/11/2024

Data de aceite: 02/12/2024

M.E. Guatemala-Cisneros

Centro de Investigación en Ciencia
Aplicada y Tecnología Avanzada del
Instituto Politécnico Nacional, Querétaro,
México

M.O. Hernández-Jiménez

Centro de Investigación en Ciencia
Aplicada y Tecnología Avanzada del
Instituto Politécnico Nacional, Querétaro,
México

J.D.A. Loa

Centro de Investigación en Ciencia
Aplicada y Tecnología Avanzada del
Instituto Politécnico Nacional, Querétaro,
México

N.G. Rojas-Avelizapa

Centro de Investigación en Ciencia
Aplicada y Tecnología Avanzada del
Instituto Politécnico Nacional, Querétaro,
México

y mejorar propiedades sensoriales las convierte en elementos indispensables en la formulación de una amplia gama de productos. Sin embargo, su inestabilidad termodinámica representa un desafío significativo, especialmente en aplicaciones donde la estabilidad a largo plazo es crucial. El objetivo de este capítulo es abordar las soluciones que desde la nanotecnología se han investigado y desarrollado para minimizar estas limitantes, específicamente la formulación de nanoemulsiones, una forma de emulsión con gotas de tamaño nanométrico. Se explorará el impacto de los emulsionantes, tanto sintéticos como naturales, en la formación y estabilidad de las nanoemulsiones, destacando su papel en la mejora de la seguridad y eficacia de diversos productos.

PALABRAS CLAVE: Compuestos bioactivos, inestabilidad termodinámica, surfactantes.

RESUMEN: Las emulsiones, constituidas por al menos dos líquidos inmiscibles entre sí, desempeñan un papel crucial en diversas industrias, desde la alimentaria hasta la farmacéutica y cosmética. Su capacidad para dispersar componentes

INTRODUCCIÓN

Las emulsiones son dispersiones coloidales que constan de al menos dos líquidos o fluidos inmiscibles entre sí (fase acuosa y fase oleosa), normalmente agua

en aceite (emulsión (w/o), esta corresponde a la dispersión de la fase acuosa en la fase oleosa aunque también puede presentarse como emulsiones de aceite en agua (emulsión (o/w), esta se presenta cuando la fase oleosa se dispersa en la fase acuosa; al formarse la emulsión uno de los líquidos queda disperso en el otro (normalmente la fase acuosa continua) en forma de pequeñas gotas (Tan & McClements et al., 2021). La clasificación de las emulsiones se ha establecido según el tamaño de las gotas macroemulsiones ($\approx 0.1 \mu\text{m}$) microemulsiones ($0.01\text{-}0.1 \mu\text{m}$) y nanoemulsiones ($20 \text{ a } 200 \text{ nm}$) (José et al., 2022; Tian et al., 2022). Esta clasificación se visualiza en la figura 1.

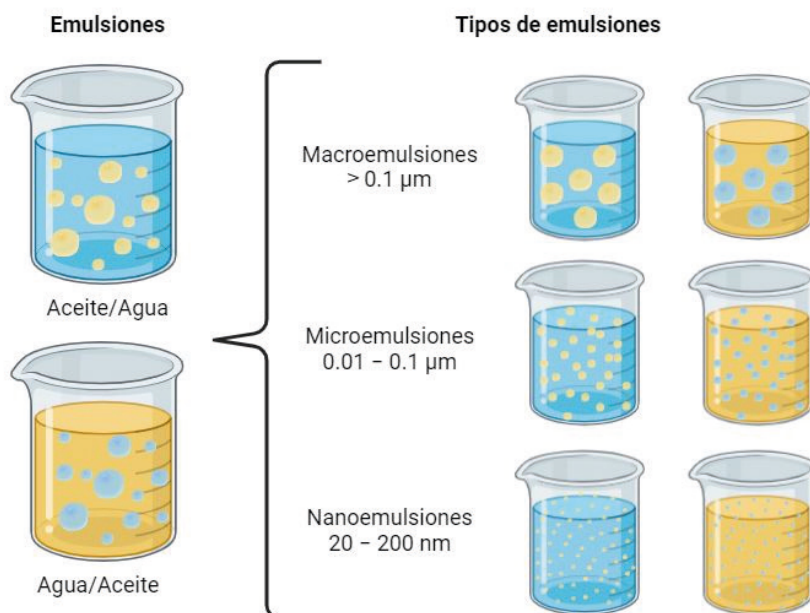


Figura 1. Emulsiones agua en aceite, aceite en agua y tipos de emulsiones.

Las emulsiones son componentes importantes de muchos productos farmacéuticos, cosméticos, productos de cuidado personal y agroquímicos (McClements, 2015; Yukuyama et al., 2015), por mencionar algunas de sus aplicaciones. Las emulsiones se emplean comúnmente en la industria alimentaria para crear una amplia variedad de productos alimenticios emulsionados como bebidas, leches, cremas, aderezos, salsas, entre otros productos alimenticios (Bai et al., 2021).

Respecto a los beneficios de las emulsiones en la industria alimentaria, estas confieren a los alimentos atributos funcionales distintos, como: apariencia, textura, mejoras en los perfiles de sabor y potencializa las sensaciones en la boca. En la industria farmacéutica y cosmética se han utilizados como vehículo para la encapsulación y administración de agentes bioactivos como vitaminas y nutraceuticos (Fig. 2).

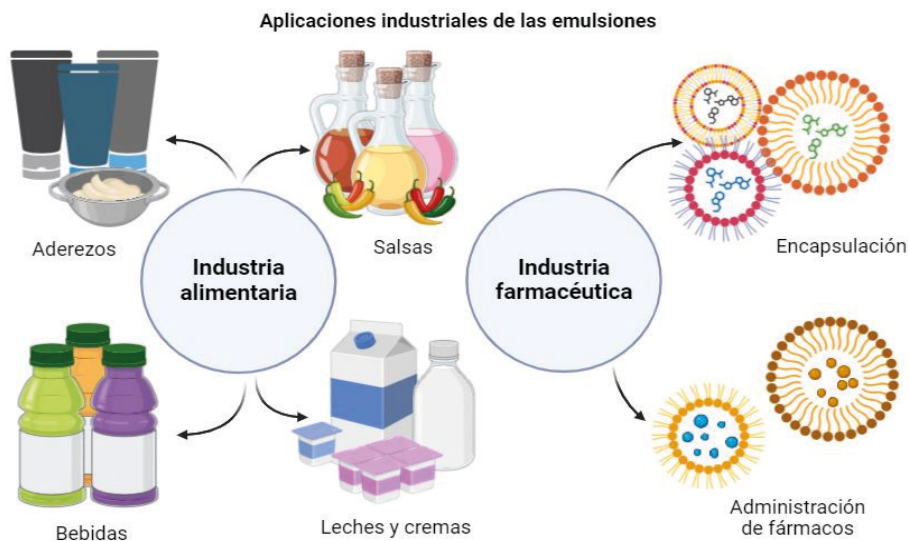


Figura 2. Aplicaciones de las emulsiones en la industria alimentaria y farmacéutica.

A pesar de que las emulsiones confieren ventajas importantes a los productos, una de las desventajas de su uso es que son termodinámicamente inestables y por lo tanto tienden a descomponerse con el tiempo debido a diversos factores como son la separación, floculación, coalescencia y separación de fases entre otros; en la industria farmacéutica, el uso de emulsiones presenta algunas salvedades ya que tienen una capacidad restringida en la liberación del componente encapsulado pues tienden a romperse (Israelachvili, 2011; Tan & McClements et al., 2021).

Sin embargo, las desventajas que presentan han dado lugar a distintas investigaciones dirigidas principalmente a, modificar el tamaño de las emulsiones para hacerlas más estables, lo cual se ha subsanado al alcanzar la escala nanométrica. Las nanoemulsiones, también conocidas como emulsiones submicrónicas o ultrafinas son emulsiones de tamaño nanométrico, con tamaños que oscilan de 20 a 200 nm (Lago et al., 2019). La formación de nanoemulsiones tiene lugar con dispersiones coloidales que son termodinámicamente inestables y que contienen gotas de aceite de un diámetro <200 nm. Su obtención se basa en enfoques de baja (energía química o agitación suave) y de alta energía (fuerzas disruptivas como sonicadores), aunque por lo general se requiere el uso de emulsionantes sintéticos (Fig. 3), (Borin et al., 2016; Ren et al., 2019; Jiang et al., 2020).

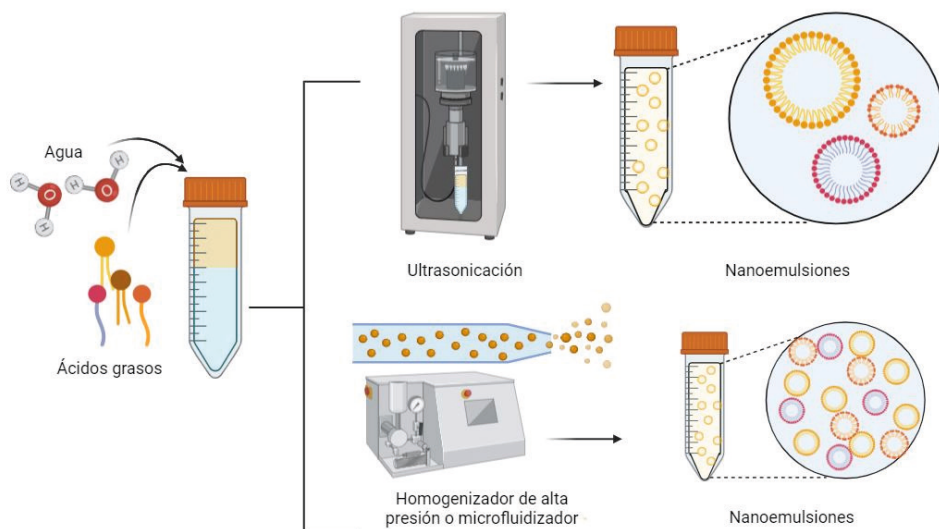


Figura 3. Síntesis de nanoemulsiones.

Las nanoemulsiones presentan varias ventajas en comparación con las emulsiones convencionales; tienen mejor estabilidad física, mejorando así la agregación de partículas y disminuyendo la separación gravitacional, pueden fabricarse en una variedad de formulaciones, dispersan débilmente la luz y por lo tanto pueden ser incorporadas en productos ópticamente transparentes, mejoran la biodisponibilidad de sustancias hidrofóbicas (Choi & McClements, 2020; Fuentes et al., 2021). Debido a la relevancia y avance en el campo de investigación, a continuación, se mencionarán las aplicaciones de nanoemulsiones en las industrias alimentaria, cosmética y farmacéutica; donde las nanoemulsiones ofrecen beneficios significativos.

Como se ha mencionado anteriormente, las nanoemulsiones presentan propiedades únicas y beneficiosas. Se constituyen principalmente por una fase oleosa, una fase acuosa y un emulsionante. Aunque los emulsionantes sintéticos ofrecen ventajas, surgen preocupaciones sobre su seguridad a largo plazo, lo que ha motivado la investigación en emulsionantes de origen natural.

NANOEMULSIONES A PARTIR DE EMULSIFICADORES/EMULSIONANTES SINTÉTICOS

Las nanoemulsiones tienen características y propiedades que dependen de su composición y método de fabricación, por ejemplo, las nanoemulsiones de aceite en agua consisten en pequeñas gotas de aceite dispersas en un medio acuoso con cada gota de aceite rodeada por una capa protectora de tensoactivo y/o emulsionante (McClements,

2012; Troncoso et al., 2012). El tamaño pequeño de las nanoemulsiones presenta dos ventajas relevantes: mejora la estabilidad de la emulsión y cuentan con la capacidad de aumentar la superficie de contacto del sistema de emulsión incrementando con ello, la biodisponibilidad de los compuestos bioactivos encapsulados (Öztürk et al., 2015).

Las nanoemulsiones están constituidas por tres componentes principales: fase oleosa, fase acuosa y surfactante. Varias son las condiciones que influyen en la formación, estabilidad y propiedades fisicoquímicas de las nanoemulsiones; por ejemplo en el caso de la fase oleosa, las características fisicoquímicas como la tensión interfacial, viscosidad y estabilidad química; en la fase acuosa, esta puede contener otros componentes polares como cosolventes, minerales, ácidos y bases, estos compuestos puede determinar la polaridad, tensión interfacial, reología, pH y fuerza iónica, almacenamiento a largo plazo; tanto la fase oleosa como la fase acuosa son imprescindibles para la elaboración de las nanoemulsiones pero por encima de estas dos, el factor más importante para el diseño adecuado es la selección correcta del emulsionante o la mezcla de ellos (McClements & Öztürk 2021), estos han sido clasificados como aniónicos, catiónicos, no iónicos, anfóteros o zwitteriónicos (Fig. 4), los cuales son fabricados a partir de productos derivados del petróleo, grasas, aceites, glicerole, ácidos orgánicos y azúcares (Dickinson, 2009).

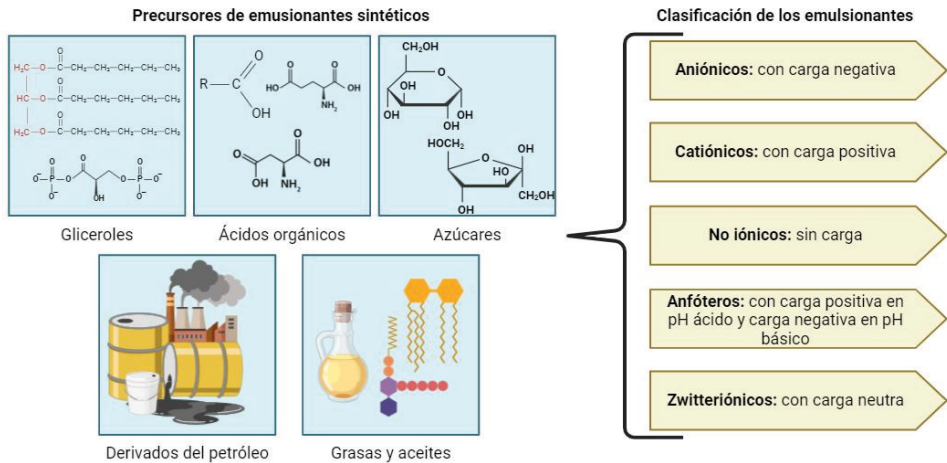


Figura 4. Precusores y clasificación de emulsionantes sintéticos.

El emulsionante a partir del cual se forma la nanoemulsión es vital para la formación de ésta y desempeña un papel clave en su estabilidad. En la industria alimentaria el uso de nanoemulsiones puede aumentar la vida de anaquel de los productos que las contienen, ayudan a mantener la estabilidad física y oxidativa, mejora las propiedades organolépticas, la viscosidad y tensión interfacial (Marhamati et al., 2021). Se ha reportado que las nanoemulsiones tienen gran éxito en encapsular compuestos bioactivos, transportarlos y mejorar su disponibilidad (Gorain et al., 2014; Bangia & Om, 2015; Zahi et al., 2015; Cenobio-Galindo et al., 2019).

El uso de emulsionantes sintéticos ofrece ventajas en la formulación de una nanoemulsión, sin embargo, se tienen algunas inquietudes con respecto a la seguridad asociada al uso de estos emulsionantes. Se ha reportado que estos emulsionantes sintéticos podrían causar síntomas tóxicos para los consumidores por la administración prolongada de los mismos. Gao et al., (2016) reportó que después de realizar pruebas clínicas se observó una posible unión de emulsionantes aniónicos a proteínas, enzimas y membranas de fosfolípidos en el cuerpo humano; lo anterior provoca alteraciones adversas, por ejemplo: disfunción de enzimas y modificación de la estructura de proteínas. Algunos otros estudios hacen referencia a su citotoxicidad; en estos últimos, se reportó que los emulsionantes no iónicos tienen menor toxicidad que los aniónicos, catiónicos y zwitterionicos; de los cuales se reportó que la toxicidad producida por los emulsionantes catiónicos es la más importante (Vlachy et al., 2009). Una limitante del uso de emulsionantes sintéticos se refiere a su baja biodegradabilidad y por ende efecto negativo al medio ambiente provocada por la acumulación de estos (García et al., 2016). Por lo anterior, en los últimos años se han realizado investigaciones para innovar en tecnologías que conlleven a la formulación de nanoemulsiones a partir de emulsionantes de origen natural.

NANOEMULSIONES A PARTIR DE EMULSIONANTES NATURALES

Se han realizado distintas investigaciones para sustituir los emulsionantes sintéticos por emulsionantes naturales. En esta búsqueda se han identificado nuevas moléculas con actividad emulsificante y con potencial para formar nanoemulsiones, dentro de estas se encuentran: proteínas, fosfolípidos, polisacáridos, lipopolisacáridos y saponinas (Fig. 5); las fuentes a partir de las cuales se obtienen son de origen biológico, como, por ejemplo: extractos de plantas, microorganismos como: hongos, bacterias y levaduras, y residuos alimentarios (Schreiner et al., 2020; McClements et al., 2021; Marhamati et al., 2021b).

En el caso de los compuestos emulsionantes provenientes de plantas, se han estudiado saponinas de quillaja (Böttcher & Drusch, 2015; Reichert et al., 2019; Zhu et al., 2019) las cuales han sido aplicadas en productos cosméticos que contienen ácido hialurónico, así como en el desarrollo de productos para el tratamiento de impurezas de la piel y como tintes para el cabello. Por otro lado, las saponinas de yuca, también se han utilizado en la formulación de emulsiones de aceite en agua, así como productos base para composiciones cosméticas y excipientes farmacéuticos. Adicionalmente, se han empleado ambas saponinas, de quillaja y yuca, como agentes emulsionantes/espumantes en una pasta de dientes orgánica (Adharsh & Sontakke, 2023). De igual forma, se ha reportado que la saponina glicirricina y soya, fueron añadidas a formulaciones cosméticas, dando lugar a una mejor estabilidad durante el almacenamiento a diferentes temperaturas y también han contribuido en la mejora de las propiedades organolépticas. En el caso de las saponinas de ginseng, éstas se han utilizado con el objetivo de obtener nanoemulsiones para el cuidado

de la piel con efectos antienviejecimiento, favoreciendo la proliferación de fibroblastos y la biosíntesis de colágeno (Fig. 5), (Schreiner et al., 2022).

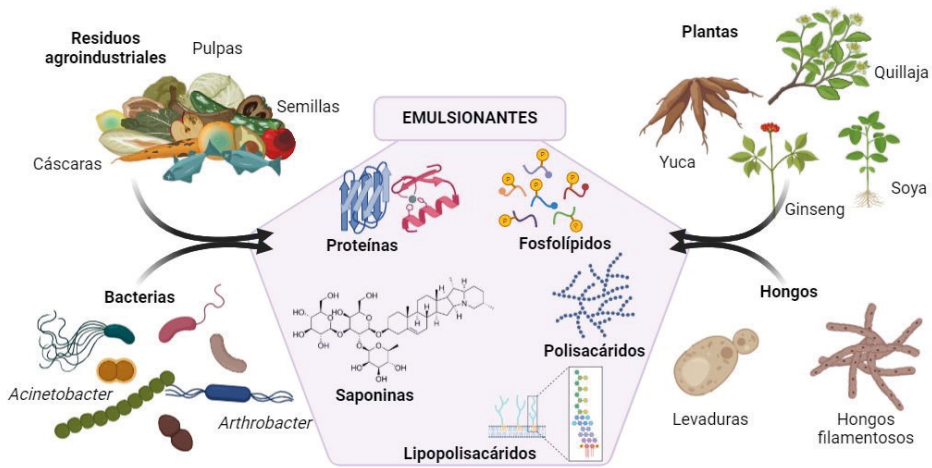


Figura 5. Precursores de emulsionantes naturales.

En cuanto a los emulsionantes provenientes de microorganismos, se han reportado que se pueden obtener a partir de hongos (soforolípidos), levaduras (ácidos grasos) y bacterias, de estas últimas, se han obtenido polisacáridos provenientes de *Arthrobacter* sp. y su uso se enfocó en la administración de proteínas y productos farmacéuticos. Por otro lado, se obtuvo un polisacárido aniónico con actividad emulsionante a partir de *Acinetobacter radioresistens*, con potencial aplicación en la administración de fármacos (Thraeib et al., 2022).

Por su parte, el uso de residuos agroindustriales también ha sido una valiosa fuente de emulsionantes, tanto de origen animal como vegetal, esto debido a que, con su uso, se podrían reducir los costos de producción y el impacto ambiental (Gayathiri et al., 2022). Principalmente, se pueden extraer de la industria frutícola y azucarera (cáscaras, pulpas y semillas), obteniendo sustratos ricos en proteínas, lípidos y carbohidratos, para la síntesis de emulsionantes (Sundaram et al., 2024). En los residuos de animales, se han obtenido fosfolípidos en tejidos de animales e incluso de leche de vaca, los cuales presentan la actividad emulsificante que se puede aprovechar para diversas áreas (Lordan & Blesso, 2023). En la Tabla 1, se enlistan algunos biosurfactantes/emulsionantes naturales que se han obtenido a partir de residuos cuyos componentes han permitido su aplicación en diversos sectores.

Residuo	Compuestos bioactivos	Uso	Tipo de biosurfactante	Aplicación	Referencia
Cáscaras, tallos de cultivos, semillas y desechos de frutas	Carotenoides, polifenoles, enzimas, fibras, aceites, carbohidratos, vitaminas, minerales	Sustrato para la producción de biosurfactantes y biocombustibles mediante fermentación microbiana	Rhamnolípidos, lipopéptidos y glicolípidos	Reducción de la tensión superficial, elaboración de productos para limpieza, recuperación mejorada de petróleo y remediación ambiental.	Chebbi et al., 2021; Kondaveeti et al., 2019; Sagar et al., 2018; Szabo et al., 2018; Schieber, 2017; Reddy et al., 2016; Paraszkiwicz et al., 2018
Fraciones de leche cruda, yogurth, queso, crema, leche en polvo.	Ácidos grasos, proteínas, lactosa, carbohidratos, minerales y vitaminas	Sustrato para la producción de biosurfactantes mediante la fermentación microbiana.	Rhamnolípidos, glicolípidos, y sophorolípidos	Reducción de tensión superficial, elaboración de productos para limpieza de superficies y remediación ambiental.	Sharma et al., 2020; Lappa et al., 2019; Enayati et al., 2018; Kushwaha et al., 2011
Suero de leche: Dulce (generado durante la elaboración de quesos) y ácido (generado en la producción de queso cottage y yogurt)	Ácidos grasos, carbohidratos, proteínas, lactosa, glucosa	Sustrato para la producción de biosurfactantes mediante fermentación microbiana.	Sophorolípidos y otros surfactantes	Industria de alimentos y bebidas, elaboración de productos de limpieza, aditivos en la alimentación animal, precursores de biocombustibles y antimicrobianos	Gomes et al., 2021; Mohanakrishna et al., 2020; Xu et al., 2019;
Melaza de caña de azúcar y remolacha	Almidón, glucosa, fructosa, vitaminas	Sustrato para la producción de biosurfactantes mediante la fermentación microbiana.	Rhamnolípidos y sophorolípidos	Aditivos en la industria alimentaria y de cosméticos, biorremediación de sitios y producción de productos de limpieza	Wongsirichot et al., 2021; Nazaret et al., 2021; Rivera et al., 2019; Martins & Martins 2018; Rane et al., 2017
Restos de aceites, tortas de semillas oleaginosas, restos de ácidos grasos y efluentes solubles en agua.	Lípidos, ácidos grasos, carbohidratos y proteínas	Sustrato para la producción de biosurfactantes mediante la fermentación microbiana.	Rhamnolípidos, biotensoactivo lipopéptido y biosurfactantes zwitterionicos	Producción de alimentos, biorremediación de suelos contaminados, productos de limpieza	Prakash et al., 2021; Sood et al., 2020; Jimoh y Lin, 2020; Hentati et al., 2019; Adetunji & Olaniran, 2019; Chen et al., 2018

Tabla 1. Surfactantes/emulsionantes naturales obtenidos a partir de residuos agroindustriales.

CONCLUSIÓN

El desarrollo de nanoemulsiones a partir de emulsionantes sintéticos y naturales representa un paso significativo hacia la mejora de la estabilidad y funcionalidad de una

amplia gama de productos de distintas industrias, desde la alimenticia, productos de limpieza, de cuidado personal hasta la industria farmacéutica, cosmética y petrolera. Si bien los emulsionantes sintéticos han demostrado ser eficaces en la formación de nanoemulsiones, su toxicidad a la salud humana y al medio ambiente plantean una gran preocupación mundial. En contraste, los emulsionantes naturales provenientes de diversas fuentes biológicas y residuos agroindustriales ofrecen una alternativa prometedora, aprovechando recursos renovables y minimizando los riesgos asociados con su uso, mediante la formulación de productos seguros, eficaces y sostenibles en diversas industrias.

REFERENCIAS

- Bai, L., Huan, S., Rojas, O. J., & McClements, D. J. (2021). Recent Innovations in Emulsion Science and Technology for Food Applications. *Journal Of Agricultural And Food Chemistry*, 69(32), 8944-8963. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c01877>
- Borin, T. R., Georges, E. L., Moraes, I. C. F., & Pinho, S. C. (2016). Curcumin-loaded nanoemulsions produced by the emulsion inversion point (EIP) method: An evaluation of process parameters and physico-chemical stability. *Journal Of Food Engineering*, 169, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.08.012>
- Böttcher, S., & Drusch, S. (2015). Interfacial Properties of Saponin Extracts and Their Impact on Foam Characteristics. *Food Biophysics*, 11(1), 91-100. <https://doi.org/10.1007/s11483-015-9420-5>
- Chebbi, A., Franzetti, A., Castro, F. D., Gomez, F. H., Tazzari, M., Sbaffoni, S., & Vaccari, M. (2021). Potentials of Winery and Olive Oil Residues for the Production of Rhamnolipids and Other Biosurfactants: A Step Towards Achieving a Circular Economy Model. *Waste And Biomass Valorization*, 12(8), 4733-4743. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01315-8>
- Chen, C., Sun, N., Li, D., Long, S., Tang, X., Xiao, G., & Wang, L. (2018). Optimization and characterization of biosurfactant production from kitchen waste oil using *Pseudomonas aeruginosa*. *Environmental Science And Pollution Research International*, 25(15), 14934-14943. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1691-1>
- Choi, S. J., & McClements, D. J. (2020). Nanoemulsions as delivery systems for lipophilic nutraceuticals: strategies for improving their formulation, stability, functionality and bioavailability. *Food Science And Biotechnology*, 29(2), 149-168. <https://doi.org/10.1007/s10068-019-00731-4>
- De Jesús Cenobio-Galindo, A., Campos-Montiel, R. G., Jiménez-Alvarado, R., Almaraz-Buendía, I., Medina-Pérez, G., & Fernández-Luqueño, F. (2019). Development and incorporation of nanoemulsions in food. *International Journal Of Food Studies*, 8(2), 105-124. <https://doi.org/10.7455/ijfs/8.2.2019.a10>
- Dickinson, E. (2009). Hydrocolloids as emulsifiers and emulsion stabilizers. *Food Hydrocolloids*, 23(6), 1473-1482. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.08.005>
- Enayati, M., Gong, Y., Goddard, J. M., & Abbaspourrad, A. (2018). Synthesis and characterization of lactose fatty acid ester biosurfactants using free and immobilized lipases in organic solvents. *Food Chemistry*, 266, 508-513. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.051>
- Fuentes, K., Matamala, C., Martínez, N., Zúñiga, R. N., & Troncoso, E. (2021). Comparative Study of Physicochemical Properties of Nanoemulsions Fabricated with Natural and Synthetic Surfactants. *Processes*, 9(11), 2002. <https://doi.org/10.3390/pr9112002>

Gao, H., Xu, R., Cao, W., Zhou, X., Yan, Y., Lu, L., Xu, Q., & Shen, Y. (2016). Food Emulsifier Glycerin Monostearate Increases Internal Exposure Levels of Six Priority Controlled Phthalate Esters and Exacerbates Their Male Reproductive Toxicities in Rats. *PLoS One*, 11(8), e0161253. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161253>

García, M., Kaczerewska, O., Ribosa, I., Brycki, B., Materna, P., & Drgas, M. (2016). Biodegradability and aquatic toxicity of quaternary ammonium-based gemini surfactants: Effect of the spacer on their ecological properties. *Chemosphere*, 154, 155-160. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.03.109>

Gayathiri, E., Prakash, P., Karmegam, N., Varjani, S., Awasthi, M. K., & Ravindran, B. (2022). Biosurfactants: Potential and Eco-Friendly Material for Sustainable Agriculture and Environmental Safety—A Review. *Agronomy*, 12(3), 662. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030662>

Gomes, J. V. P., Oliveira, L. A., Pereira, S. M. S., Da Conceição, A. R., Anunciação, P. C., De Souza, E. C. G., Perrone, Í. T., Da Silva Junqueira, M., Santana, H., & Della Lúcia, C. M. (2021). Comparison of bioactive compounds and nutrient contents in whey protein concentrate admixture of turmeric extract produced by spray drying and foam mat drying. *Food Chemistry*, 345, 128772. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128772>

Gorain, B., Choudhury, H., Kundu, A., Sarkar, L., Karmakar, S., Jaisankar, P., & Pal, T. K. (2014). Nanoemulsion strategy for olmesartan medoxomil improves oral absorption and extended antihypertensive activity in hypertensive rats. *Colloids And Surfaces B: Biointerfaces*, 115, 286-294. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2013.12.016>

Hentati, D., Chebbi, A., Hadrich, F., Frikha, I., Rabanal, F., Sayadi, S., Manresa, Á., & Chamkha, M. (2019a). Production, characterization and biotechnological potential of lipopeptide biosurfactants from a novel marine *Bacillus stratosphericus* strain FLU5. *Ecotoxicology And Environmental Safety*, 167, 441-449. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.036>

Hentati, D., Chebbi, A., Hadrich, F., Frikha, I., Rabanal, F., Sayadi, S., Manresa, Á., & Chamkha, M. (2019b). Production, characterization and biotechnological potential of lipopeptide biosurfactants from a novel marine *Bacillus stratosphericus* strain FLU5. *Ecotoxicology And Environmental Safety*, 167, 441-449. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.036>

[https://doi.org/10.13040/ijpsr.0975-8232.6\(4\).1363-72](https://doi.org/10.13040/ijpsr.0975-8232.6(4).1363-72). (2015). *International Journal Of Pharmaceutical Sciences And Research*, 6(4). [https://doi.org/10.13040/ijpsr.0975-8232.6\(4\).1363-72](https://doi.org/10.13040/ijpsr.0975-8232.6(4).1363-72)

Israelachvili, J. N. (2011). Intermolecular and Surface Forces. En *Elsevier eBooks* (p. iii). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-391927-4.10024-6>

Jiang, T., Liao, W., & Charcosset, C. (2020). Recent advances in encapsulation of curcumin in nanoemulsions: A review of encapsulation technologies, bioaccessibility and applications. *Food Research International*, 132, 109035. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109035>

Jimoh, A. A., & Lin, J. (2020). Biotechnological Applications of *Paenibacillus* sp. D9 Lipopeptide Biosurfactant Produced in Low-cost Substrates. *Applied Biochemistry And Biotechnology*, 191(3), 921-941. <https://doi.org/10.1007/s12010-020-03246-5>

Jose, D., Muenmuang, C., Kitiborwornkul, N., Yasurin, P., Asavasanti, S., Tantayotai, P., & Sriariyanun, M. (2022). Effect of surfactants and Co-surfactants in formulation of noni fruit extract in virgin coconut oil-based emulsion. *Journal Of The Indian Chemical Society*, 99(10), 100729. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100729>

Kondaveeti, S., Abu-Reesh, I. M., Mohanakrishna, G., Pant, D., & He, Z. (2019). Utilization of residual organics of Labaneh whey for renewable energy generation through bioelectrochemical processes: Strategies for enhanced substrate conversion and energy generation. *Bioresource Technology*, 286, 121409. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121409>

Kushwaha, J. P., Srivastava, V. C., & Mall, I. D. (2011). An Overview of Various Technologies for the Treatment of Dairy Wastewaters. *Critical Reviews In Food Science And Nutrition*, 51(5), 442-452. <https://doi.org/10.1080/10408391003663879>

Lago, A. M. T., Neves, I. C. O., Oliveira, N. L., Botrel, D. A., Minim, L. A., & De Resende, J. V. (2019). Ultrasound-assisted oil-in-water nanoemulsion produced from *Pereskia aculeata* Miller mucilage. *Ultrasonics Sonochemistry*, 50, 339-353. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.09.036>

Lappa, I. K., Papadaki, A., Kachrimanidou, V., Τέππου, Α., Koulougliotis, D., & Eriotou, E. (2019). Cheese Whey Processing: Integrated Biorefinery Concepts and Emerging Food Applications. *Foods*, 8(8), 347. <https://doi.org/10.3390/foods8080347>

Lordan, R., & Blesso, C. N. (2023). Editorial: Phospholipids and sphingolipids in nutrition, metabolism, and health. *Frontiers In Nutrition*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1153138>

Marhamati, M., Ranjbar, G., & Rezaie, M. (2021a). Effects of emulsifiers on the physicochemical stability of Oil-in-water Nanoemulsions: A critical review. *Journal Of Molecular Liquids*, 340, 117218. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117218>

Marhamati, M., Ranjbar, G., & Rezaie, M. (2021b). Effects of emulsifiers on the physicochemical stability of Oil-in-water Nanoemulsions: A critical review. *Journal Of Molecular Liquids*, 340, 117218. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117218>

Martins, P. C., & Martins, V. G. (2018). Biosurfactant production from industrial wastes with potential remove of insoluble paint. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 127, 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.11.005>

McClements, D. J. (2012). Nanoemulsions versus microemulsions: terminology, differences, and similarities. *Soft Matter*, 8(6), 1719-1729. <https://doi.org/10.1039/c2sm06903b>

McClements, D. J. (2015). Food emulsions. En *CRC Press eBooks*. <https://doi.org/10.1201/b18868>

McClements, D. J., Das, A. K., Dhar, P., Nanda, P. K., & Chatterjee, N. (2021). Nanoemulsion-Based Technologies for Delivering Natural Plant-Based Antimicrobials in Foods. *Frontiers In Sustainable Food Systems*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.643208>

McClements, D. J., & Öztürk, B. (2021). Utilization of Nanotechnology to Improve the Handling, Storage and Biocompatibility of Bioactive Lipids in Food Applications. *Foods*, 10(2), 365. <https://doi.org/10.3390/foods10020365>

Mohanakrishna, G., Abu-Reesh, I. M., & Pant, D. (2020). Enhanced bioelectrochemical treatment of petroleum refinery wastewater with Labaneh whey as co-substrate. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76668-0>

N, A. A., & Sontakke, M. (2023). Plant-based emulsifiers: Sources, extraction, properties and applications. *Pharma Innovation*, 12(5), 08-16. <https://doi.org/10.22271/tpi.2023.v12.i5a.20043>

- Nazareth, T. C., Zanutto, C. P., Tripathi, L., Juma, A., Maass, D., De Souza, A. A. U., & Banat, I. M. (2020). The use of low-cost brewery waste product for the production of surfactin as a natural microbial biocide. *Biotechnology Reports*, 28, e00537. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00537>
- Öztürk, B., Argin, S., Özilgen, M., & McClements, D. J. (2015). Formation and stabilization of nanoemulsion-based vitamin E delivery systems using natural biopolymers: Whey protein isolate and gum arabic. *Food Chemistry*, 188, 256-263. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.005>
- Paraszkiewicz, K., Bernat, P., Kuśmierska, A., Chojniak, J., & Płaza, G. (2018). Structural identification of lipopeptide biosurfactants produced by *Bacillus subtilis* strains grown on the media obtained from renewable natural resources. *Journal Of Environmental Management*, 209, 65-70. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.033>
- Prakash, A. A., Prabhu, N. S., Rajasekar, A., Parthipan, P., AlSalhi, M. S., Devanesan, S., & Govarthanam, M. (2021). Bio-electrokinetic remediation of crude oil contaminated soil enhanced by bacterial biosurfactant. *Journal Of Hazardous Materials*, 405, 124061. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124061>
- Rane, A., Baikar, V. V., Kumar, D. V. R., & Deopurkar, R. L. (2017). Agro-Industrial Wastes for Production of Biosurfactant by *Bacillus subtilis* ANR 88 and Its Application in Synthesis of Silver and Gold Nanoparticles. *Frontiers In Microbiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00492>
- Reddy, K. S., Khan, M., Archana, K., Reddy, M. J., & Hameeda, B. (2016). Utilization of mango kernel oil for the rhamnolipid production by *Pseudomonas aeruginosa* DR1 towards its application as biocontrol agent. *Bioresource Technology*, 221, 291-299. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.041>
- Reichert, C. L., Salminen, H., & Weiß, J. (2019). QuillajaSaponin Characteristics and Functional Properties. *Annual Review Of Food Science And Technology*, 10(1), 43-73. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-032818-122010>
- Ren, G., Sun, Z., Wang, Z., Zheng, X., Xu, Z., & D, S. (2019). Nanoemulsion formation by the phase inversion temperature method using polyoxypropylene surfactants. *Journal Of Colloid And Interface Science*, 540, 177-184. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.01.018>
- Rivera, Á. D., Urbina, M. Á. M., & López, V. E. L. Y. (2019). Advances on research in the use of agro-industrial waste in biosurfactant production. *World Journal Of Microbiology & Biotechnology Incorporating The MIRCEN Journal Of Applied Microbiology And Biotechnology/World Journal Of Microbiology & Biotechnology*, 35(10). <https://doi.org/10.1007/s11274-019-2729-3>
- Sagar, N. A., Pareek, S., Sharma, S., Yahia, E. M., & Lobo, M. (2018). Fruit and Vegetable Waste: Bioactive Compounds, Their Extraction, and Possible Utilization. *Comprehensive Reviews In Food Science And Food Safety*, 17(3), 512-531. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12330>
- Schieber, A. (2017). Side Streams of Plant Food Processing As a Source of Valuable Compounds: Selected Examples. *Annual Review Of Food Science And Technology*, 8(1), 97-112. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030216-030135>
- Schreiner, T. B., Dias, M. M., Barreiro, M., & Pinho, S. P. (2022). Saponins as Natural Emulsifiers for Nanoemulsions. *Journal Of Agricultural And Food Chemistry*, 70(22), 6573-6590. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c07893>
- Schreiner, T. B., Santamaria-Echart, A., Ribeiro, A., Peres, A. M., Dias, M. M., Pinho, S. P., & Barreiro, M. F. (2020). Formulation and Optimization of Nanoemulsions Using the Natural Surfactant Saponin from Quillaja Bark. *Molecules (Basel. Online)*, 25(7), 1538. <https://doi.org/10.3390/molecules25071538>

- Sharma, P., Gaur, V. K., Kim, J. S., & Pandey, A. (2020). Microbial strategies for bio-transforming food waste into resources. *Bioresource Technology*, 299, 122580. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122580>
- Sood, U., Singh, D., Hira, P., Lee, J., Kalia, V. C., Lal, R., & Shakarad, M. (2020). Rapid and solitary production of mono-rhamnolipid biosurfactant and biofilm inhibiting pyocyanin by a taxonomic outlier *Pseudomonas aeruginosa* strain CR1. *Journal Of Biotechnology*, 307, 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2019.11.004>
- Szabo, K., Cătoi, A., & Vodnar, D. C. (2018). Bioactive Compounds Extracted from Tomato Processing by-Products as a Source of Valuable Nutrients. *Plant Foods For Human Nutrition*, 73(4), 268-277. <https://doi.org/10.1007/s11130-018-0691-0>
- Tan, C., & McClements, D. J. (2021). Application of Advanced Emulsion Technology in the Food Industry: A Review and Critical Evaluation. *Foods*, 10(4), 812. <https://doi.org/10.3390/foods10040812>
- Thanigaivel, S., Govindarajan, R. K., Saranya, V., Krishnan, V., Nagarajan, S., Gnanasekaran, G. R., Baek, K., & Sekar, S. K. R. (2024). Advancements in biosurfactant production using agro-industrial waste for industrial and environmental applications. *Frontiers In Microbiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1357302>
- Thraeib, J. Z., Altemimi, A. B., Al-Manhel, A. J. A., Abedelmaksoud, T. G., El-Maksoud, A. A. A., Madankar, C. S., & Cacciola, F. (2022). Production and Characterization of a Bioemulsifier Derived from Microorganisms with Potential Application in the Food Industry. *Life (Basel)*, 12(6), 924. <https://doi.org/10.3390/life12060924>
- Tian, Y., Zhou, J., He, C., He, L., Li, X., & Sui, H. (2022). The Formation, Stabilization and Separation of Oil–Water Emulsions: A Review. *Processes*, 10(4), 738. <https://doi.org/10.3390/pr10040738>
- Troncoso, E., Aguilera, J. M., & McClements, D. J. (2012). Fabrication, characterization and lipase digestibility of food-grade nanoemulsions. *Food Hydrocolloids*, 27(2), 355-363. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.10.014>
- Vlachy, N., Jagoda-Cwiklik, B., Vácha, R., Touraud, D., Jungwirth, P., & Kunz, W. (2009). Hofmeister series and specific interactions of charged headgroups with aqueous ions. *Advances In Colloid And Interface Science (Print)*, 146(1-2), 42-47. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.09.010>
- Wongsirichot, P., Ingham, B., & Winterburn, J. (2021). A review of sophorolipid production from alternative feedstocks for the development of a localized selection strategy. *Journal Of Cleaner Production*, 319, 128727. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128727>
- Xu, J., Hao, J., Guzman, J. J. L., Spirito, C. M., Harroff, L. A., & Angenent, L. T. (2018). Temperature-Phased Conversion of Acid Whey Waste Into Medium-Chain Carboxylic Acids via Lactic Acid: No External e-Donor. *Joule*, 2(2), 280-295. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.11.008>
- Yukuyama, M. N., Ghisleni, D. D. M., De Jesus Andreoli Pinto, T., & Bou-Chacra, N. A. (2015). Nanoemulsion: process selection and application in cosmetics – a review. *International Journal Of Cosmetic Science*, 38(1), 13-24. <https://doi.org/10.1111/ics.12260>
- Zahi, M. R., Liang, H., & Yuan, Q. (2015). Improving the antimicrobial activity of d-limonene using a novel organogel-based nanoemulsion. *Food Control*, 50, 554-559. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.10.001>

Zhu, Z., Ye, W., Yi, J., Cao, Y., Liu, F., & McClements, D. J. (2019). Comparison of natural and synthetic surfactants at forming and stabilizing nanoemulsions: Tea saponin, Quillaja saponin, and Tween 80. *Journal Of Colloid And Interface Science (Print)*, 536, 80-87. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.10.024>

IDENTIFICAÇÃO VEICULAR E EXAME QUÍMICO-METALOGRÁFICO EM MOTOCICLETA

Data de submissão: 06/11/2024

Data de aceite: 02/12/2024

Leonardo de Paula Miranda

Doutor em Ciências da Saúde pela Universidade Estadual de Montes Claros – Unimontes. Perito Criminal Oficial da Seção Técnica Regional de Criminalística de Pirapora-MG.

Thatiane Lopes Oliveira

Doutora em Ciências da Saúde pela Universidade Estadual de Montes Claros – Unimontes. Docente do Eixo Tecnológico do Instituto Federal do Norte de Minas Gerais.

Leila Conceição de Paula Miranda

Mestre em Ensino em Saúde. Docente do Instituto Federal do Norte de Minas Gerais.

RESUMO: Os ensaios químico-metalográfico e de identificação veicular são exames frequentemente efetuados na seara pericial criminal. Dessa forma, o objetivo deste estudo foi identificar uma motocicleta mediante avaliação dos seus elementos identificadores e execução de exame químico-metalográfico no Número de Identificação Veicular (NIV) e sequencial alfanumérico do motor, com o fito de se recuperar os caracteres

originais adulterados. Trata-se de um relato de caso referente a uma motocicleta. Por meio de avaliação macroscópica dos elementos de identificação veicular, foram constatadas: placa alfanumérica de identificação veicular apresentando estrutura e lacre de segurança rompidos; etiqueta de identificação veicular afixada ao chassi, manifestando parca nitidez; as sequências alfanuméricas presentes no NIV e motor haviam sido quase integralmente suprimidas por ação mecânica. Após preparo das superfícies metálicas do chassi e motor, aplicaram-se sobre o NIV o reagente Besseman e sobre a liga metálica do motor o ácido clorídrico concentrado. Sequencialmente à aplicação dos reativos, observou-se a revelação dos caracteres originais subjacentes pertencentes ao NIV e motor veicular. Destarte, por intermédio dos exames expressos, foi tecnicamente possível identificar o veículo analisado. Outrossim, cumpre-se enfatizar a patente existência de *gap* literário referente à temática abordada no campo criminalístico, ensejando a realização de novos estudos nessa área do conhecimento.

PALAVRAS-CHAVE: Supressão; Metais; Metalografia; Indicadores; Reagentes.

VEHICLE IDENTIFICATION AND CHEMICAL-METALLOGRAPHIC EXAMINATION IN MOTORCYCLE

ABSTRACT: Chemical-metallographic and vehicle identification tests are exams frequently carried out in the criminal forensics field. Therefore, the objective of this study was to identify a motorcycle by evaluating its identifying elements and carrying out a chemical-metallographic examination on the Vehicle Identification Number (NIV) and the engine's alphanumeric sequence, with the aim of recovering the adulterated original characters. This is a case report regarding a motorcycle. Through macroscopic evaluation of the vehicle identification elements, the following were found: alphanumeric vehicle identification plate showing broken structure and security seal; vehicle identification label affixed to the chassis, showing poor clarity; the alphanumeric sequences present in the NIV and engine had been almost entirely suppressed by mechanical action. After preparing the metal surfaces of the chassis and engine, Besseman reagent was applied to the NIV and concentrated hydrochloric acid was applied to the metal alloy of the engine. Sequentially to the application of reagents, the underlying original characters belonging to the NIV and vehicle engine were revealed. Therefore, through express exams, it was technically possible to identify the vehicle analyzed. Furthermore, it is necessary to emphasize the patent existence of a literary gap regarding the theme addressed in the criminal field, giving rise to new studies in this area of knowledge.

KEYWORDS: Suppression; Metals; Metallography; Indicators; Reagents.

1 | INTRODUÇÃO

Observa-se que os veículos automotores, devido ao seu expressivo valor monetário, são comumente objetos de roubo e furto. Assim, o infrator, com o fito de se obter vantagem monetária, adultera os sinais identificativos veiculares, aspirando a expor o veículo como sem restrição de circulação, mimetizando-o como um automotor legalizado (Pereira, 2017).

Destaca-se que a identificação veicular e o ensaio químico-metalográfico são exames frequentemente efetuados pelos profissionais peritos criminais. Dessa forma, considerando a constância no surgimento de delitos associados às adulterações dos caracteres alfanuméricos do Número de Identificação Veicular - NIV (número do chassi) e dos caracteres de identificação presentes nos motores automotivos, torna-se mister a atuação pericial em tais casos, com o fito de se estabelecer a materialidade criminosa, evidenciar e recuperar os caracteres originais suprimidos/adulterados e efetivar a identificação dos veículos por intermédio de seus elementos identificadores (número do motor, NIV, etiquetas autoadesivas, plaquetas, caixa de câmbio e demais agregados) (Bruni, Velho, Oliveira, 2019; Stunvoll, Quintela, 2019; Tocchetto, Espindula, 2019).

O exame químico-metalográfico é caracterizado pela aplicação de reativos sobre a chapa metálica adulterada, visando a evidenciar numerações anteriores/originais, comumente suprimidas de forma superficial (Tocchetto, Espindula, 2019). Elencado ataque químico se constitui em um processo corrosivo controlado oriundo da ação de reagentes normalmente constituídos por componentes ácidos (Bruni, Velho, Oliveira,

2019). Considerando o exposto, nos casos suspeitos de regravação e/ou supressão de numeração identificadora veicular em superfícies metálicas, o perito criminal deverá proceder aos ensaios químico-metalográficos devidos (Tocchetto, Espindula, 2019).

Insta salientar que o profissional forense deve estar atento às principais adulterações efetuadas em caracteres de veículos automotores, destacando-se: regravação, remoção da numeração de chassi, recobrimento, transplante/implante e remontagem (Bruni, Velho, Oliveira, 2019; Stunvoll, Quintela, 2019).

Diante do elencado, o objetivo deste estudo foi identificar um veículo automotor do tipo motocicleta e averiguar a presença de adulteração nos seus elementos identificadores, bem como sua eventual recuperação, por meio de exame pericial de identificação veicular e ensaio químico-metalográfico realizado no sequencial alfanumérico do motor e NIV, segundo requisição pericial emitida por autoridade policial.

2 | METODOLOGIA

Trata-se de um relato de caso em que o exame pericial veicular foi realizado no município de Pirapora-MG, em julho de 2024. A perícia criminal foi acionada por autoridade policial competente e compareceu ao local onde o automotor se encontrava custodiado, realizando os devidos trabalhos técnicos forenses.

Constatou-se tratar de uma motocicleta marca Honda, modelo CG 150 Titan, exibindo pintura automotiva preta e provida de placa alfanumérica de identificação veicular (Figura 01). Após análise macroscópica dos elementos identificadores do veículo aludido, pôde-se verificar: placa alfanumérica de identificação veicular (HDA2510) apresentando estrutura e lacre de segurança rompidos (Figura 02); etiqueta de identificação veicular afixada ao chassi manifestando parca nitidez (“apagamento”) e constando as seguintes inscrições (visualização efetuada por intermédio do uso de luz visível rasante): “CG150KSMIX” “PRETA” “9C2KC16109R022047” (Figura 03); a sequência alfanumérica presente no motor (*****2047) fora parcialmente suprimida, por meio de ação mecânica produzida mediante uso de instrumento rígido (Figura 04), e, após análise macroscópica forense ampliada, identificou-se, com parca nitidez, a sequência original subjacente: KC16E19022047 (Figura 05); a sequência alfanumérica original do NIV (chassi), gravada na face externa da lateral direita do cachimbo, havia sido quase integralmente suprimida, por meio de ação mecânica produzida com uso de instrumento rígido, exibindo somente os seguintes caracteres: *****2047 (*caracteres não identificados no início dos exames) (Figura 06).

O ensaio foi iniciado com a limpeza da superfície metálica que continha o NIV, mediante aplicação local de solvente *Thinner* (composto por acetato de etila, tolueno e álcool anidro). Seguidamente, procedeu-se ao lixamento sequencial e progressivo da referida superfície, utilizando-se lixas com granulometria progressiva (entre 220 e 1200). Após o preparo inicial da superfície metálica, realizou-se o ataque químico macrográfico,

por meio do uso do reagente Besseman (álcool etílico, ácido clorídrico, cloreto férrico e cloreto cúprico) disperso em chumaço de algodão. Efetuaram-se quatro aplicações consecutivas do reativo, com duração de 02 minutos cada. Posteriormente à aplicação do reativo sobre o chassi veicular, observaram-se os vestígios remanescentes dos caracteres originais suprimidos, os quais foram integralmente identificados de forma técnica (9C2KC16109R022047) (Figura 07).

Executou-se também o ataque químico sobre a superfície do motor que continha sua sequência alfanumérica. Foi aplicado sobre essa superfície o reagente ácido clorídrico concentrado (35%), difundido em algodão. Efetuou-se aplicação única do produto, com duração de 01 minuto. Consecutivamente à aplicação do produto, foram observados os vestígios remanescentes dos caracteres originais suprimidos, sendo possível identificá-los integralmente, com parca nitidez (KC16E19022047) (Figura 08).



Figura 01. Vista dos setores posterior e esquerdo da motocicleta examinada.

Fonte: elaborado pelos autores (2024).



Figura 02. Placa de identificação veicular manifestando estrutura e lacre de segurança rompidos.

Fonte: elaborado pelos autores (2024).

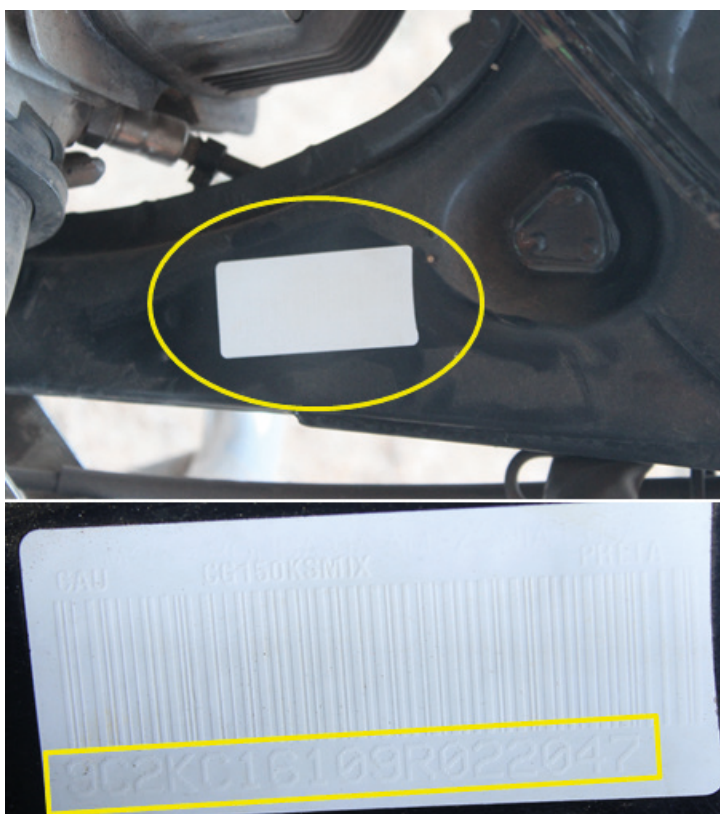


Figura 03. Etiqueta de identificação veicular evidenciando o NIV original do veículo (9C2KC16109R022047).

Fonte: elaborado pelos autores (2024).



Figura 04. Supressão parcial da sequência alfanumérica do motor veicular.

Fonte: elaborado pelos autores (2024).



Figura 05. Identificação macroscópica ampliada da sequência alfanumérica original subjacente presente no motor (KC16E19022047).

Fonte: elaborado pelos autores (2024).



Figura 06. Supressão quase integral da sequência alfanumérica do NIV (chassi).

Fonte: elaborado pelos autores (2024).



Figura 07. Evidenciação do NIV após aplicação do ácido (2009)9C2KC16109R022047)

Fonte: elaborado pelos autores (2024).



Figura 08. Evidenciação da sequência alfanumérica do motor após aplicação ácida (KC16E19022047).

Fonte: elaborado pelos autores (2024).

3 | DISCUSSÃO

Salienta-se que foi efetuado acesso à plataforma *Base de Índice Nacional* (BIN), constatando-se que o NIV 9C2KC16109R022047 revelado no procedimento forense se vinculava à motocicleta, marca Honda, modelo CG150 Titan MIX KS, ano/modelo de fabricação 2009/2009, cor preta, espécie passageiro e motor KC16E19022047. Tais características são compatíveis com as expressas pelos elementos de identificação observados no veículo examinado.

No caso em tela, o ataque químico das superfícies metálicas se mostrou eficiente na revelação dos caracteres suprimidos do NIV e do motor. Segundo destacam Stumvoll

e Quintela (2019), é fundamental que o conhecimento concernente à composição da liga metálica veicular norteie a escolha do reagente adequado para as superfícies automotoras a serem examinadas.

Pontua-se, complementarmente, que a motocicleta periciada exibia um registro no Sistema de Informações Policiais com sinalização de roubo/furto. Posteriormente à devida identificação técnica veicular, a motocicleta permanecera à disposição da autoridade policial requisitante e oportunamente foi devidamente restituído ao legítimo proprietário.

Urge destacar como desvantagem desse tipo de ataque químico, seu potencial efeito destrutivo sobre a superfície metálica veicular, considerando sua ação corrosiva. Logo, indigitado procedimento exige cautela profissional, conhecimento técnico e uso de Equipamento de Proteção Individual (EPI) adequado (Pereira *et al.*, 2016).

Verifica-se que os reagentes mais empregados sobre as ligas metálicas constituintes de chassi veicular são o Bessman, Fry e determinados ácidos diluídos. No que se refere às ligas metálicas constituintes dos motores, as substâncias mais indicados são os reativos Keller, Tuckers, entre outros ácidos (Stunvoll, Quintela, 2019; Tocchetto, Espindula, 2019; Abreu *et al.*, 2018). Bruni, Velho e Oliveira (2019) indicam uma solução à base de ácido clorídrico concentrado (37%) (solução agressiva) para uso em superfície constituída por aço inoxidável. A literatura recomenda ainda que, após a aplicação do reagente químico, a superfície metálica seja limpa e protegida contra corrosão, por meio de aplicação local de graxa (como feito no caso em tela) ou outro agente anticorrosivo (Tocchetto, Espindula, 2019). Urge esclarecer que, neste ensaio, optou-se pela utilização do Bessman como reagente de ataque ao chassi veicular, considerando sua indicação científica e por ser o reativo recomendado de forma protocolar pelo Instituto de Criminalística do Estado de Minas Gerais, para essa tipologia de procedimento pericial.

Miranda e Oliveira (2022) descrevem um relato de caso concernente à motocicleta, em que o ataque químico no NIV e caracteres do motor, utilizando reativo Bessman e ácido clorídrico concentrado (35%), mostraram-se eficientes na revelação da codificação original subjacente, possibilitando a precisa identificação do automotor periciado.

Finalmente, consigna-se que há um patente *gap* literário relacionado à expresso campo criminalístico, com poucos relatos atinentes à identificação veicular e exame químico-metalográfico em automotores, precipuamente em veículos do tipo motocicleta, ensejando a realização de novos estudos.

4 | CONCLUSÃO

Após a realização dos exames periciais na motocicleta analisada, pôde-se identificar integralmente os caracteres que compunham originalmente a sequência alfanumérica do chassi veicular (NIV) (9C2KC16109R022047) e do motor automotivo (KC16E19022047).

Cumpra ressaltar que a análise técnica e conjugada das evidências observadas, bem como a execução do devido ensaio químico-metalográfico, possibilitaram à perícia criminal efetivar eficazmente a identificação técnica da motocicleta examinada.

REFERÊNCIAS

Abreu, BMPN. Silva, JK. Ferreira, TSS. Laizo, WS. Análise químico-metalográfica e identificação veicular (clonagem). **Olhar Criminológico**. 2018; 1: 31-35.

Bruni, AT. Velho, JÁ. Oliveira, MF. **Fundamentos de Química Forense**. 2.ed. Campinas, SP: Millennium; 2019.

Miranda, LP. Oliveira, TL. Exame químico-metalográfico e identificação veicular em automotor do tipo motocicleta: relato de caso. **Brazilian Journal of Forensic Sciences, Medical Law and Bioethics**. 2022; 11(3):128-135.

Pereira, WN. Araújo, WMP. Silva, AS. Cavalcante, AAF. Porto, JAS. Cunha, JCA. Salgado, MF. Aplicação do reagente químico Fry na revelação de números de identificação veicular (NIV) de veículos automotores, realizado pelo Instituto de Criminalística de Timon/MA. **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais. Anais**. Natal (RN). 2016. p. 7932-7940.

Pereira, WN. Uso do sal inorgânico persulfato de amônio e do ácido Fry na identificação de adulterações em chassis de automóveis no Instituto de Criminalística de Timon/MA. **Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais)**. Instituto Federal do Piauí. Teresina, PI; 2017.

Stunvoll, VP. Quintela, VM. **Criminalística**. 7.ed. Campinas, SP: Millennium; 2019.

Tocchetto, D. Espindula, A. **Criminalística. Procedimentos e Metodologias**. 4.ed. Campinas, SP: Millennium; 2019.

GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS QUÍMICOS GERADOS EM LABORATÓRIOS DE ENSINO E PESQUISA DE UM CENTRO UNIVERSITÁRIO DO NORTE DO PARANÁ (BRASIL)

Data de submissão: 08/11/2024

Data de aceite: 02/12/2024

Angélica de Almeida Moura

Centro Universitário Ingá – Departamento
de Biomedicina
Maringá – PR
<http://lattes.cnpq.br/3914076782213841>

Raiani Randoli

Centro Universitário Ingá – Departamento
de Biomedicina
Maringá-PR
<http://lattes.cnpq.br/9385032599966185>

Vagner Marques de Moura

Universidade Estadual de Maringá –
Departamento de Química
Maringá – PR
<https://orcid.org/0000-0002-8463-9594>

RESUMO: Resíduos gerados pelas atividades de ensino e pesquisa nas universidades tem se tornado um importante tema de pesquisa no que se refere a questões ambientais. Assim, julgam-se necessários diagnosticar e elaborar planos de ação para a gestão de resíduos, principalmente sob o ponto de vista da minimização, segregação, reutilização e destinação final adequada. Este trabalho teve por objetivo estabelecer estratégias de tratamento e recuperação de resíduos químicos utilizando métodos

clássicos de análises químicas a partir de amostras obtidas da rotina laboratorial dos laboratórios de graduação e pesquisa de um Centro Universitário do Norte do Paraná (Brasil). Resíduos de soluções ácidas e alcalinas, foram diluídas, neutralizadas e descartadas na rede de esgoto. Soluções de íons metálicos atóxicos e não poluentes foram diluídas e descartadas adequadamente. Amostras contendo Ni e Mn foram tratadas com $\text{NaOH}_{(\text{aq})}$ seguido de excesso de solução de Na_2CO_3 e dimetilglioxima. Os precipitados destes metais foram incinerados. Soluções dos metais Ba^{2+} e Sr^{2+} foram analiticamente precipitados e incinerados. Amostras contendo o metal Pb, foram submetidos a precipitação e o material gerado foi armazenado para reutilização. Resíduos contendo misturas de líquidos miscíveis com solventes halogenados e não halogenados foram tratados por destilação fracionada e em evaporador rotativo. Os solventes destilados foram devidamente armazenados e disponibilizados para reutilização. Este trabalho demonstrou que é possível recuperar grande parte dos resíduos químicos gerados nos laboratórios, além de ser economicamente viável torna-se uma ferramenta útil na minimização do impacto destes resíduos na saúde pública

e no meio ambiente.

PALAVRAS-CHAVE: Gerenciamento de resíduos, Neutralização, Precipitação, Destilação.

WASTE MANAGEMENT PROGRAM FOR CHEMICAL RESIDUES GENERATED IN BOTH TEACHING AND RESEARCH LABORATORIES OF UNIVERSITY CENTER OF NORTHERN PARANÁ (BRAZIL)

ABSTRACT: Waste generated through teaching and research activities at universities has become a major concern in relation to environmental issues. So, are required to diagnose and develop action plans for the management of waste, mainly from the standpoint of minimization, segregation, reuse and disposal. This work aimed to establish strategies for the treatment and recovery of chemical waste using classical methods of chemical analysis from residues generated in both teaching and research laboratories at a University Center of Northern Paraná (Brazil). Waste acidic and alkaline solutions were diluted, neutralized and disposed of in the sink. Mixtures of metal ions and their solutions were diluted and disposed of in the sink. Samples of Ni and Mn were treated with $\text{NaOH}_{(\text{aq})}$, excess solution of Na_2CO_3 and dimethylglyoxime. The precipitates of Ni and Mn were incinerated. Solutions of Ba^{2+} and Sr^{2+} were duly precipitates and incinerated. Samples containing Pb were treated and the residue was stored for reuse. The waste from liquid miscible blends between halogenated solvents and non-halogenated were subjected to fractional distillation or evaporation methods. The pure liquids were made available for reuse. This work has shown that it is possible to recover a large part of the chemical waste generated in laboratories, in addition to being economically viable becomes a useful tool in minimizing the impact of these wastes on public health and on the environment.

KEYWORDS: Waste management, Neutralization, Precipitation, Distillation.

1 | INTRODUÇÃO

Atualmente, um dos maiores desafios e problemas na preservação ambiental tem sido o controle da poluição em todas as partes do mundo contemporâneo. A exposição contínua frente a diferentes poluentes atmosféricos, químicos tóxicos e resíduos descartados de maneira inadequada no meio ambiente tem consequências diretas na sustentabilidade dos principais ecossistemas, bem como na saúde humana, os quais podem gerar efeitos irreversíveis e destrutivos nas suas diversas formas (Ahmad *et al.*, 2022).

A ação antrópica tem contribuído para a destruição e deterioração dos recursos naturais comprometendo a sustentabilidade do meio ambiente, incentivando, que muitos países procurem alternativas em relação a manutenção, preservação e restauração dos ecossistemas naturais (Huo & Peng, 2023). Neste sentido, são necessárias ainda a implementação de políticas públicas eficientes, elaboração de padrões de qualidade ambiental, bem como o incentivo do uso de técnicas mais limpas e a conscientização de todos sobre a importância do cuidado e preservação de todo o meio ambiente (Ali *et al.*, 2022; Murano & Tavares, 2022).

A necessidade de adotar estratégias e programas para a conservação e preservação ambiental tem sido uma prática importante principalmente no que tange a conscientização da população, empresas e indústrias sobre os danos nocivos produzidos pelas diversas atividades dos diferentes setores geradores. Sabe-se que muitos dos efluentes e resíduos liberados constituem-se de uma matriz rica em nutrientes, contaminantes orgânicos e inorgânicos, os quais comprometem o solo, a água e o ar (Bünemann *et al.*, 2024).

No entanto, a produção de resíduos químicos não se restringe apenas as indústrias, outro importante setor gerador a ser considerado são os laboratórios de escolas, faculdades, centros universitários, institutos de pesquisas e universidades. Comumente são gerados resíduos de diferentes características químicas, em menores quantidades em relação ao setor industrial, porém com o mesmo grau de toxicidade e periculosidade aos seres vivos e ao meio ambiente (Mistura; Vaniel; Linck, 2010).

As estratégias de gerenciar resíduos químicos provindos de laboratórios de ensino e pesquisa de faculdades, centros universitários e universidades brasileiras foram iniciados através de importantes discussões a partir da década de 90, sendo de grande importância para todas as instituições geradoras. Porém, a ineficiência de fiscalização por órgãos competentes, falta de visão e descartes inadequados levaram muitas instituições a poluir de forma indiscriminada e sem controle (Marinho *et al.*, 2011).

Deve-se também considerar o desperdício de materiais que poderiam ser reaproveitados e os elevados custos devido ao mau gerenciamento dos produtos sintetizados ou manipulados. Sabe-se que muitos resíduos tiveram seus destinos finais no sistema de esgoto doméstico, jogados indiscriminadamente na pia dos laboratórios sem nenhuma preocupação com as consequências que isto poderia acarretar ao meio ambiente (Afonso *et al.*, 2003; Cunha, 2007).

Portanto, houve uma necessidade das instituições de ensino superior do Brasil buscar ferramentas importantes para o gerenciamento e tratamento de seus resíduos, com o intuito de não apenas promover uma diminuição no impacto ambiental, mas também de conscientizar e treinar todos os profissionais envolvidos nessa área (Silva; Soares; Afonso, 2010; Marinho *et al.*, 2011).

O estabelecimento de um senso crítico e ético entre a comunidade acadêmica, professores, discentes e responsáveis técnicos é imprescindível. O conhecimento da toxicidade, periculosidade, disposição final adequada, formas para a diminuição do volume gerado e quando possível a recuperação dos resíduos provindos das atividades práticas é essencial (Amorim, 2018).

Na efetivação da mudança de hábitos faz-se necessária a implementação de um programa de gerenciamento de resíduos (PGR), que tem por objetivo definir as fontes geradoras, especificar e quantificar os rejeitos finais, contar com métodos que possibilitem a redução de matérias primas, empregar técnicas para a recuperação e reutilização dos resíduos. É primordial a constante reavaliação do programa, para um adequado descarte,

visto que o resíduo de hoje pode ser o reagente útil de amanhã (Phrophayak *et al.*, 2024).

A resolução RDC da ANVISA 306 (2004) relata sobre o Regulamento Técnico no gerenciamento de resíduos de serviços de saúde (RSS), de forma que esse trata do conjunto de procedimentos de gestão, desde o seu planejamento e implementação através de bases científicas, técnicas, normativas e legais, com o intuito de minimizar a geração de resíduos e destiná-los de forma segura e eficiente, de modo à proteger os manipuladores, a saúde pública, os recursos naturais e o meio ambiente. Desta forma, a elaboração do PGR deve atender à Resolução CONAMA N° 358/2005 e deve conter as responsabilidades administrativa (representante legal do estabelecimento quanto a gestão de resíduos de serviços de saúde) e técnica (elaborado por profissional habilitado pelo seu conselho de classe).

Como regra geral, têm-se que antes da utilização de qualquer substância química deve-se conhecer um método para o seu descarte seguro. Além disso, imposto a norma de responsabilidade objetiva isto é, quem gerou o resíduo é responsável pelo mesmo, estando tipificado na lei 6938, de 31 de agosto de 1981, conhecida como Política Nacional do Meio Ambiente, portanto o manipulador do reagente químico tem a obrigação de tratar e dispor o rejeito de forma adequada, caso isso não ocorra o causador do dano fica sujeito ao pagamento de indenização (Jardim, 1998; Tavares & Bendassolli, 2005).

Técnicas tradicionais de tratamento e recuperação devem ser priorizadas, como a neutralização, separação, oxidação, precipitação, e troca iônica. Após o procedimento, o elemento químico fica disponível para a reutilização, colaborando para a minimização dos problemas ambientais, racionando recursos, entrando em concordância com a legislação e mudando a mentalidade na formação de novos cidadãos (Mistura; Vaníel; Linck, 2010).

Considerando a importância do gerenciamento de resíduos gerados em Instituições de Ensino e Pesquisa no Brasil, este trabalho teve por objetivo realizar o tratamento de amostras providas de laboratórios de um Centro Universitário do Norte do Paraná, com o intuito de estabelecer métodos de reuso, segregação, destinação final adequada, substituição de reagentes tóxicos, limitação de procedimentos práticos para a minimização do consumo de reagentes e contenção de recursos para os métodos de tratamentos, afim de promover a saúde ocupacional dos que manipulam tais produtos, bem como na preservação da contaminação do meio ambiente por produtos químicos.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Programa de Gerenciamento de Resíduos Químicos de um Centro Universitário do Norte do Paraná

Neste trabalho, utilizou-se a pesquisa exploratória descritiva, desenvolvida como estudo de caso em uma Instituição de Ensino Superior (IES) localizada na região Norte do Paraná. Foram coletados dados no período de quatro anos (janeiro de 2013 a janeiro

de 2017) para elaboração de um inventário. A partir das informações coletadas de planilhas enviada por cada setor que possuía laboratório gerador de resíduo, foi possível diagnosticar e verificar a situação dos resíduos químicos, bem como propor métodos de tratamento e recuperação dos mesmos, quando possível. Todo o procedimento utilizado no desenvolvimento da pesquisa pode ser observado na Figura 1.

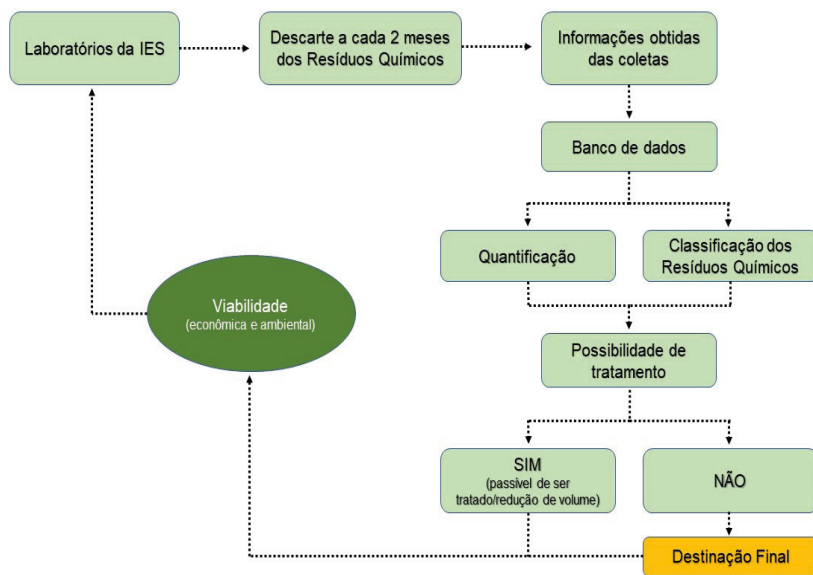


Figura 1: Visão geral das etapas empregadas em todo processo de tratamento e destinação dos resíduos químicos.

Fonte: Adaptado de Amorim, 2018.

2.1.1 Levantamentos dos dados nos laboratórios

A coleta dos dados sobre os resíduos químicos gerados por cada laboratório da IES foi obtida a partir das informações no inventário dos passivos. No banco de dados criado para a elaboração do inventário de resíduos químicos continham as seguintes informações: laboratório gerador, proporções, quantidades de cada tipo de resíduo, classe química, características físicas e dados gerais.

2.1.2 Caracterização e quantificação dos passivos

Os resíduos químicos gerados na IES foram agrupados de acordo com critérios de compatibilidade de resíduos perigosos e sua quantificação ocorreu a cada dois meses, após o descarte. Neste processo, foram estabelecidas sete classes de resíduos químicos, conforme dispostos na Tabela 1.

Classes de Resíduos Químicos	Principais características
Solventes orgânicos	Líquidos em mistura (miscível ou imiscível) sem a presença de halogênios, em que a proporção do solvente orgânico deve ser maior
Solventes organoclorados	Líquidos em mistura (miscível ou imiscível) contendo átomo de cloro na composição
Corrosivos	Líquidos com características de corrosividade de caráter ácido ou alcalina
Sais Orgânicos	Líquidos ou sólidos contendo sais orgânicos, em que a proporção do sal orgânico deve ser maior
Sais Inorgânicos	Líquidos ou sólidos contendo sais inorgânicos, em que a proporção do sal inorgânico deve ser maior
Outros	Substâncias ou misturas que não se enquadrem em nenhuma classe anterior
Sem Identificação	Frascos sem rótulos, ou com identificação contendo informações insuficientes

Tabela1. Principais classes de resíduos químicos identificados nos laboratórios para tratamento

A coleta dos resíduos foi realizada no final de cada atividade experimental, acondicionando-os em recipientes plásticos (polietileno) ou em vidro âmbar, dependendo da classificação do resíduo, devidamente identificados. O volume ocupado pelos passivos nos recipientes não ultrapassou 2/3 de sua capacidade. Na área interna de cada laboratório gerador foram armazenados em recipientes de até 2 L de capacidade, permanecendo no local por 2 meses.

2.1.3 Verificação da possibilidade e viabilidade de tratamento dos passivos

A partir da identificação e agrupamento dos resíduos por compatibilidade química, fez-se uma separação daqueles que podem ser submetidos a tratamento e recuperação. Foram considerados aptos para tratamento aqueles que apresentam pouca impureza e/ou de misturas com composição não complexa, além do que contém substâncias com baixa toxicidade.

Todos os resíduos que não apresentaram viabilidade de tratamento, foram codificados, registrados no sistema e encaminhados para o abrigo externo da IES para posterior recolhimento por uma empresa terceirizada responsável pela disposição final em aterro, coprocessamento ou incineração.

2.2 Tratamento dos resíduos passivos

2.2.1 Soluções de caráter ácida e alcalina

As amostras contendo soluções ácidas de H_2SO_4 , HCl , HNO_3 e CH_3COOH foram inicialmente monitoradas com papel indicador de pH (Merck®) para averiguação do nível de periculosidade e corrosividade das mesmas. Em seguida, as soluções foram diluídas e neutralizadas em NaOH 0,1 M até atingirem pH entre 6 a 8.

As amostras contendo soluções alcalinas de NaOH , NH_4OH , NH_4Cl e KOH também foram monitoradas com papel indicador de pH com os mesmos objetivos anteriores. Nesta etapa, as soluções foram diluídas e neutralizadas em HCl 0,1 M até atingirem pH entre 6 a 8.

2.2.2 Soluções residuais de íons metálicos do grupo I, II e III

Os resíduos contendo soluções de sais de Na, K, Mg, Ca e NH_4^+ foram submetidos à diluição em bombonas e posteriormente foram descartadas na pia sem risco de contaminação do meio ambiente.

Todos os passivos de sais de nitrato, cloreto, sulfato, fosfato de Fe, Al e Zn sofreram precipitação seletiva. O sobrenadante foi diluído e descartado na pia e os precipitados foram calcinados em mufla por 8 h a 900 °C.

2.2.3 Soluções aquosas de íons bário e estrôncio

Os resíduos passivos de solução aquosa dos metais bário e estrôncio foram neutralizados com NaOH 1 M até pH 7, em seguida adicionou-se solução 10% (m/v) de $\text{Na}_2\text{SO}_{4(\text{aq., exc.})}$ para precipitação total e seletiva dos mesmos. Os precipitados $\text{BaSO}_{4(\text{s})}$ e $\text{SrSO}_{4(\text{s})}$ gerados foram devidamente filtrados e secos ao ar. No resíduo de bário, houve a formação de um precipitado adicional de coloração amarelo, identificado como $\text{BaCrO}_{4(\text{s})}$. Os precipitados obtidos por filtração simples foram submetidos à calcinação em mufla por 8 h a 900 °C. A solução residual contendo Cr^{6+} não foi passível de tratamento e, portanto, foi armazenada e encaminhada ao Abrigo Externo (Afonso *et al.*, 2003).

2.2.4 Soluções dos íons metálicos níquel e manganês

Soluções contendo resíduos de níquel e manganês foram submetidas à neutralização com NaOH 1 M até pH 7, em seguida adicionou-se solução 10% (m/v) de $\text{Na}_2\text{CO}_{3(\text{aq., exc.})}$ até total precipitação. Os precipitados foram filtrados e o sobrenadante foi avaliado com solução de dimetil-glioxima, até resultado negativo (perda da cor vermelha). Posteriormente, estas soluções foram neutralizadas com HCl 1 M sem formação de compostos insolúveis. Os resíduos obtidos por filtração foram submetidos à calcinação em mufla durante 8 h a 900°C

e a solução final neutralizada foi descartada na pia (Afonso *et al.*, 2003).

2.2.5 Solução de metal pesado – chumbo

Os resíduos contendo o metal pesado chumbo foram inicialmente filtrados para remoção do sal de chumbo formado no fundo do recipiente, e submetidos a secagem em dessecador. Na solução residual, foram adicionados 50 mL de ácido acético glacial e 500 mL de cromato de potássio até total precipitação do chumbo, observado pela formação de um sólido amarelo insolúvel. O precipitado filtrado foi devidamente armazenado. Na solução filtrada, foi adicionada uma solução em meio ácido de tiocetamida previamente aquecida até total formação de um precipitado preto resultante da precipitação do sulfeto de chumbo. Desta filtração, no sobrenadante ainda foi visualizado a formação de um precipitado verde indicativo de íons dicromato, os quais foram reduzidos de Cr^{4+} à Cr^{3+} mediante adição de $\text{HCl}_{(\text{conc.})}$ (Silva; Costa; Santos, 2013). Todos os precipitados obtidos foram devidamente acondicionados e encaminhados ao Abrigo Externo.

2.2.6 Solventes organoclorados residuais

Misturas de solventes organoclorados contendo hexano/clorofórmio, clorofórmio/acetato de etila, clorofórmio/metanol, clorofórmio/éter etílico e clorofórmio/acetona, foram submetidas a destilação fracionada. No processo de destilação cerca de 1,5 L de cada mistura foi colocada em um balão de fundo redondo (ebulidor) com capacidade para 2 L e fixado a uma manta de aquecimento termostatzada. O sistema de fracionamento foi realizado numa coluna Vigreux adaptada num sistema de banho ultratermostático microprocessado com circulador de água. A separação entre os solventes ocorreu através do controle da temperatura de ebulição dos líquidos na mistura. No processo, os solventes tratados foram acondicionados em recipientes adequados para posterior reutilização nas atividades experimentais (Sassiotto, 2005). A cabeça e a cauda dos solventes destilados foram descartadas e encaminhadas para o Abrigo Externo, devidamente identificados.

2.2.7 Solventes não clorados residuais

Misturas de solventes não clorados contendo hexano/acetato de etila, hexano/metanol e acetato de etila/metanol foram submetidas a rota evaporação em evaporador rotativo sob pressão reduzida e ou destilação fracionada conforme metodologia do item 2.2.6. A escolha do método dependeu essencialmente das características azeotrópicas e do ponto de ebulição entre os líquidos. Todos os solventes tratados foram acondicionados em recipientes adequados para posterior reutilização nas atividades experimentais. A cabeça e a cauda dos solventes destilados dispostos em frascos de vidro âmbar, posteriormente encaminhados para o Abrigo Externo, devidamente identificados.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

O banco de dados foi elaborado a partir do levantamento dos passivos em cada laboratório através do inventário. Verificou-se que após o gerenciamento de cada classe de resíduos gerados foi possível reaproveitar uma grande parte. A correta segregação dos resíduos na fonte mediante suas características e propriedades com o intuito de minimizar o volume dos mesmos para o tratamento está regulamentado pelo CONAMA 358 (2005).

Nosso estudo corroborou com os dados publicados por Vaz e colaboradores (2010), Gerbasse e colaboradores (2005) e Tavares e Bendassoli (2005) que demonstraram preocupações com o gerenciamento de resíduos químicos provindos de Instituições de Ensino Superior.

Através das informações obtidas do banco de dados e inventários, fez-se a separação dos resíduos para tratamento e ou recuperação.

O processo de neutralização consistiu na minimização do potencial de toxicidade, reatividade e inflamabilidade dos resíduos de caráter ácido e alcalino. Na neutralização recomenda-se reagir os ácidos fortes com bases fracas e as bases fortes com ácidos fracos. Segundo a resolução CONAMA nº20/86 art. 21, para que uma solução seja descartada num corpo de água, o pH deve estar entre 5 e 9. No entanto, por questões de precaução os resíduos tratados por neutralização devem apresentar pH entre 6 e 8, pois o pH da solução pode ser alterado ao ser descartado na rede de esgoto.

Os resultados das reações de neutralização bem como as características de cada passivo, estão dispostos na tabela 2.

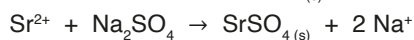
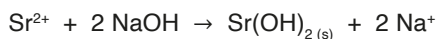
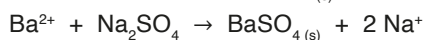
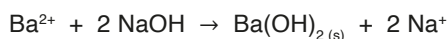
Composição do resíduo	Características visuais	pH	Vol. a ser tratado (L)	Procedimento empregado	Vol. Recuperado (L)	Destinação final
HCl:HNO ₃	líquido incolor	2	4	neutralização	4	descarte pia
H ₂ SO ₄ :HCl:corantes	líquido avermelhado	3	4	neutralização	4	descarte pia
Mistura desconhecida	líquido incolor	2	5	neutralização	5	descarte pia
CH ₃ CO ₂ H:HCl	líquido incolor	3	10	neutralização	6	descarte pia
NaOH:NH ₄ OH	líquido incolor	12	10	neutralização	10	descarte pia
KOH:NaOH:CuSO ₄	líquido azul	10	6	neutralização	6	descarte pia
NH ₄ Cl:NH ₄ OH	líquido incolor	12	11	neutralização	12	descarte pia

Tabela 2. Tratamento de resíduos de caráter ácido e alcalino mediante reações de neutralização.

Segundo Lassali e colaboradores (2013), compostos solúveis em água com limites de pelo menos 0,1 g ou 0,1 mL/3 mL que apresentem baixa toxicidade, podem ser descartados na rede de esgoto somente após diluição na proporção de 1:100 e liberados

sob água corrente. Todos os resíduos de soluções de sais de Na, K, Mg, Ca e NH_4^+ , bem como soluções de sais de nitrato, cloreto, sulfato, fosfato de Fe, Al e Zn, se enquadram nesta categoria de resíduos, desta forma, eles foram submetidos à diluição em bombonas de 50 L e posteriormente foram descartados na pia sem risco de contaminação do meio ambiente. A etapa de diluição é de extrema relevância, pois apesar do resíduo de natureza química apresentar baixa toxicidade, pode ser que ao final do processo existem outras espécies com concentração mais elevada.

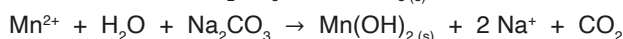
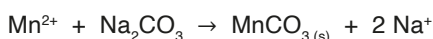
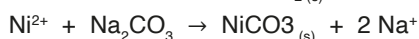
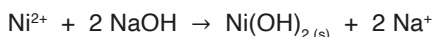
No tratamento dos resíduos contendo sais dos íons Ba e Sr foi utilizada a técnica da precipitação uma vez que estes íons após serem neutralizados com base forte (NaOH) reagiram com o $\text{Na}_2\text{SO}_{4(\text{aq. exc.})}$ para formação de seus respectivos precipitados, sendo devidamente retidos na membrana filtrante após filtração. As reações que se verificam são:

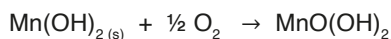


No final do processo, foram observados para o bário e estrôncio os aspectos dos precipitados e soluções residuais. Ambos se apresentaram na forma de sólidos insolúveis de coloração branca-amarelada e solução alaranjada. Neste processo, o precipitado adicional de coloração amarela foi identificado como sendo um BaCrO_4 provindo provavelmente de alguma contaminação na mistura entre os resíduos no momento do acondicionamento dos mesmos. Todos os precipitados foram devidamente calcinados em mufla por 8 h a 900 °C e descartados em lixo comum, enquanto que a solução contaminada por Cr^{6+} não foi passível de tratamento neste trabalho, sendo armazenada e disponibilizada no Abrigo Externo para recolhimento da empresa terceirizada.

Nos resíduos passivos de níquel e manganês a neutralização foi conduzida utilizando base forte (NaOH) e seguido de adição de uma solução de carbonato de sódio em excesso. Os precipitados formados de coloração verde para o Ni e marrom para o Mn foram recolhidos em membrana filtrante e na solução residual foi realizada a complexação utilizando dimetil-glioxima para remoção total do Ni e Mn, caso os íons estejam ainda em solução (Wilde, 2018). Os precipitados foram devidamente calcinados e descartados no lixo comum.

As reações estão representadas a seguir:





Os resultados obtidos nos tratamentos dos resíduos contendo íons bário, estrôncio, níquel e manganês são muito próximos e compatíveis com os obtidos no trabalho realizado por Afonso e colaboradores (2003), indicando a efetividade e reprodutibilidade das técnicas empregadas.

Os dados obtidos dos procedimentos estão ilustrados na tabela 3.

Composição do resíduo	Características visuais	pH	Vol. a ser tratado (L)	Procedimento empregado	Vol. recuperado	Destino final
Sais de Na e K	Líquido incolor	6	6	Diluição	6	descarte pia
Sais de Ca e Mg	Líquido incolor	6	4	Diluição	4	descarte pia
Sais de NH_4^+	Líquido incolor	6	5	Diluição	5	descarte pia
Sais de $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^-$ ($\text{Fe}^{3+}/\text{Al}^{3+}/\text{Zn}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$)	Líquido verde claro	5	12	Diluição	12	descarte pia
Sais de $\text{SO}_4^{2-}/\text{PO}_4^{2-}$ ($\text{Na}^+/\text{Al}^{3+}/\text{Zn}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$)	Líquido incolor	5	13	Diluição	13	descarte pia
Sais de $\text{Ba}^{2+}/\text{Sr}^{2+}$	Líquido amarelado	5	8	Neutralização Precipitação Calcinação	8	descarte pia lixo comum
	Líquido verde claro					
Sol. de Ni e Mn		6	5	Neutralização Precipitação Calcinação	5	descarte pia lixo comum

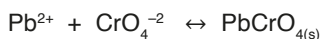
Tabela 3. Resultados obtidos no tratamento de resíduos de sais de íons metálicos

O chumbo é um elemento metálico que pertence ao grupo I na classificação dos cátions e produzem cloretos insolúveis. No entanto, o PbCl_2 é ligeiramente solúvel em água, o que dificulta a total precipitação do mesmo na presença de solução de ácido clorídrico. Assim, os íons chumbo residuais são quantitativamente precipitados em meio ácido utilizando ácido sulfúrico.

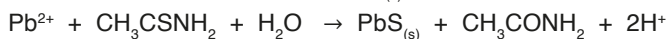
O tratamento do chumbo foi realizado inicialmente com a filtração dos sólidos depositados nos fracos decorrentes da formação de precipitados de $\text{PbCl}_{2(s)}$ quando em repouso por muito tempo. A solução residual, foi acidificada utilizando solução de ácido acético 6 M e em seguida a total precipitação foi realizada com adição de solução de cromato de potássio. Foi observada a formação de sólidos insolúveis de coloração amarela recolhidos após filtração, como mostra a tabela 4.

Composição do resíduo	Características visuais	pH	Vol. a ser tratado (L)	Procedimento empregado	Vol. recuperado	Destinação final
Sais de Pb ²⁺	Líquido escuro	9	5	Neutralização Precipitação Redução Calcinação	4	1. Sol. residual (pia) 2. Ppto Armazenado

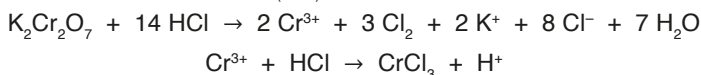
Tabela 4. Utilização de técnicas analíticas no tratamento e disposição final de resíduos contendo sais de chumbo.



A solução residual foi tratada com solução de tiocetamida em meio ácido com aquecimento brando de forma a precipitar todo o chumbo. No final do processo, obteve-se um sólido preto decorrente do precipitado de PbS_(s).



Da filtração, após recolher o PbS_(s) foi visualizado a formação de um outro precipitado de coloração verde, indicativo de íons dicromato no sobrenadante, os quais foram reduzidos de Cr⁴⁺ à Cr³⁺ mediante adição de HCl_(conc.) (Silva; Costa; Santos, 2013).



Sabe-se que o chumbo é um metal pesado altamente tóxico ao homem e aos animais, sendo considerado um importante contaminante ambiental. As principais fontes de contaminação do meio ambiente são decorrentes das atividades industriais do tipo eletromecânica, química e eletroquímicas, além dos processos de mineração, fabricação de baterias e águas subterrâneas provenientes de locais contaminados. O chumbo metálico, seus sais e óxidos, fazem parte integrante de tintas, pigmentos, tubulações antigas e nos aditivos de combustíveis. (Bhattacharjee *et al.*, 2003; Reed & Jamil, 1995).

Os seus efeitos nocivos do podem afetar praticamente todos os órgãos e sistemas do corpo humano e as principais vias de contaminação são inalação ou ingestão, sendo diretamente absorvido, distribuído e excretado. Os principais sítios de absorção são os tratos gastrointestinal e respiratório, este metal é absorvido, fica concentrado no sangue, tecidos moles e principalmente nos ossos. Sua excreção ocorre pela urina e fezes (Moreira & Moreira, 2004).

Neste sentido, a busca por metodologias capazes de tratar e recuperar este importante metal contaminante é extremamente relevante para a sociedade e para o meio ambiente (Amorim, 2018).

A técnica da destilação fracionada é uma operação unitária que tem como objetivo a separação de misturas considerando a diferença de volatilidade (ponto de ebulição)

dos compostos. As fases produzidas durante a destilação são formadas por evaporação e condensação sucessivas e o processo pode ser controlado utilizando uma fonte de aquecimento (Stichlmair & Fair, 1998). Assim, os resíduos provindos das misturas de líquidos miscíveis entre solventes organoclorados: hexano:clorofórmio, clorofórmio:acetato de etila e clorofórmio:éter etílico foram tratados por destilação e ou rota evaporação.

No caso das misturas entre clorofórmio:metanol e clorofórmio:acetona, que formam azeótropos de pontos de ebulição iguais a 38 °C e 64 °C, respectivamente, contendo 93% e 78% dos clorados, em peso, foi possível separar os componentes através de lavagem com água (20% do volume de solvente orgânico) (Di Vitta *et al.*, 2004). Todos os solventes tratados foram devidamente rotulados e disponibilizados para reutilização em outras atividades.

Os solventes não clorados, principalmente misturas entre *n*-hexano e acetato de etila, por formarem mistura azeotrópica de mesmo ponto de ebulição (65 °C), e com 62% de *n*-hexano, em peso, não foi possível a separação por destilação. Isto se deve também ao fato de que a maior parte dos hexanos comerciais contém misturas de composição variada de isômeros tais como metil-pentanos, dimetil-butanos, etc. Estes interferentes dificultam a resolução e separação de misturas entre os solventes (Di Vitta *et al.*, 2004). Como não foi possível a recuperação destes resíduos, os mesmos foram encaminhados ao Abrigo Externo.

As demais misturas foram recuperadas por destilação fracionada ou rota evaporação. Os dados destes procedimentos estão dispostos na tabela 5.

Composição da mistura	Características visuais	Vol. (L)	Procedimento empregado	Vol. recuperado	Destinação final
CHCl ₃ :MeOH	Líquido incolor	6	Destilação fracionada	6	Reutilização
Hex:CHCl ₃	Líquido incolor	3	Destilação fracionada	3	Reutilização
CHCl ₃ :AcOEt	Líquido incolor	3	Destilação fracionada	3	Reutilização
CHCl ₃ :(C ₂ H ₅)O	Líquido incolor	3	Evaporação sob pressão reduzida	2	Reutilização Armazenamento
CHCl ₃ :Acetona	Líquido incolor	3	Lavagem com H ₂ O	3	Reutilização
CHCl ₃ :óleo:CH ₃ CO ₂ H	Líquido imiscível	5	Decantação em funil Destilação fracionada	3	Armazenamento Reutilização
Hex:AcOEt	Líquido incolor	7	Mistura azeotrópica sem tratamento	0	Armazenamento
Hex:MeOH	Líquido em fases	3	Evaporação sob pressão reduzida	3	Reutilização
AcOEt:MeOH	Líquido incolor	5	Destilação fracionada	5	Reutilização

Tabela 5. Dados da separação da mistura de solventes organoclorados e não clorados por destilação fracionada e evaporação sob pressão reduzida.

De maneira geral, pode-se observar que é possível recuperar alguns tipos de resíduos de composição simples aplicando métodos de análises químicas, porém algumas dificuldades foram encontradas durante o trabalho experimental.

Os procedimentos utilizados com base nas regras de solubilidade, reações de precipitação, reações redox e destilação fracionada forneceram resultados bastante satisfatórios, porém, considerando tais métodos para amostras industriais ou rejeitos sem identificação a complexidade certamente será imprevisível devido a origem das diferentes substâncias presentes.

Os resíduos com identificação inadequada ou sem nenhuma rotulagem foram destinados ao Abrigo Externo da IES, para recolhimento da empresa terceirizada.

Segundo Afonso e colaboradores (2003), não há como propor uma rota única para a recuperação de cada elemento ou de preparo para disposição final, mas são necessárias adaptações a partir das propostas estabelecidas no meio científico, para se obter êxito no tratamento dos diversos tipos de rejeitos.

Outra questão importante é conscientização coletiva neste processo, pois sem a participação de todos os envolvidos, dificilmente se obterá resultados que visem à minimização, segregação, tratamento e destino final dos resíduos. Portanto, todos os setores da Educação que geram resíduos são potenciais poluidores e assim, devem estabelecer um Plano de Gerenciamento de Resíduos a fim de minimizar os impactos na saúde pública e no meio ambiente.

4 | CONCLUSÃO

A utilização de produtos químicos nos laboratórios de ensino e pesquisa de uma Instituição de Ensino Superior resulta na produção de resíduos potencialmente nocivos ao homem e ao meio ambiente e, portanto, são necessárias medidas para minimização e controle dos impactos nos diferentes ambientes. Neste sentido, este trabalho foi desenvolvido com a responsabilidade de gerenciar, tratar e dispor de forma adequada os resíduos químicos gerados em um Centro Universitário da região Norte do Paraná.

A apreciação dos efeitos alcançados através dos resultados obtidos permite-nos estabelecer que os tratamentos sistemáticos aplicados na recuperação da maioria dos rejeitos encontrados, demonstraram de certa forma grande eficiência e reprodutibilidade. Além disso, o fato de se reutilizar reagentes tratados contribuiu para que não haja descarte inadequado dos produtos químicos, além de diminuição de custos, promovendo uma maior sustentabilidade, fundamentada em três principais pilares: financeiro, social e ambiental. Pode-se ainda, inferir que essas medidas promove uma maior visibilidade perante a sociedade.

Certamente o envolvimento e comprometimento de Instituições de Ensino Superior e de toda a comunidade acadêmica, permitirão a promoção de consciência ambiental

essenciais para o desempenho no gerenciamento dos resíduos estando, portanto, de acordo com as normativas e leis ambientais vigentes no Brasil.

REFERÊNCIAS

Afonso, J.C.; Noronha, L.A.; Felipe, R.P.; Freidinger, N. Gerenciamento de resíduos laboratoriais: recuperação de elementos e preparo para descarte final. **Química Nova**, v. 26, n. 4, p. 602-611, 2003.

Ahmad, F.; Saeed, Q.; Shah, S.M.U.; Gondal, M.A.; Mumtaz, S. Environmental sustainability: Challenges and approaches. **Natural Resources Conservation and Advances for Sustainability**. p. 243-270, 2022.

Ali, S.; Xu, H.; Yang, K.; Solangi, Y.A. Environment management policy implementation for sustainable industrial production under power asymmetry in the graph model. **Sustainable Production and Consumption**. v. 29, p. 636-648, 2022.

Amorim, P.M.S. **Estratégias de tratamento de resíduos químicos gerados na FCF/USP**. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Bioquímico-Farmacêutica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018 (Dissertação de Mestrado).

Bhattacharjee, S.; Chakrabarty, S.; Maity, S.; Kar, P.; Thakur, B.G. Removal of lead from contaminated water bodies using sea nodule as an adsorbent. **Water Research**, v. 37, p. 3954-3966, 2003.

Bünemann, E.K.; Reimer, M.; Smolders, E.; Smith, S.R.; Bigalke, M.; Palmqvist, a.; Brandt, K.K.; Moller, K.; Harder, R.; Hermann, L.; Speiser, B.; Oudshoorn, F.; Løesl, A.K.; Magid, J. Do contaminants compromise the use of recycled nutrients in organic agriculture? A review and synthesis of current knowledge on contaminant concentrations, fate in the environment and risk assessment. **Science of the Total Environment**. 912 (2024) 168901.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 358, de 29 de abril de 2005. Dispõe sobre o tratamento e a disposição final dos resíduos dos serviços de saúde e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da União, edição de 04 de maio de 2005.

Cunha, C.J. O programa de gerenciamento dos resíduos laboratoriais do Departamento de Química da UFPR. **Química nova**, v. 24, n. 3, p. 424-427, 2001.

Di Vitta, P.B.; Toyofuki, N.A.; Faria, D.L.A.; Marzorati, L.; Baptista, M.; Bertotti, M.; Serrano, S.H.P.; Di Vitta, C.; Baader, J.W. Reutilização de reagentes e outras experiências realizadas na central de tratamento de resíduos químicos e solventes do Instituto de Química da USP. In: **Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em resíduos e desenvolvimento sustentável**. Costão do Santinho – Florianópolis-SC, 2004.

Gerbase, A.E.; Coelho, F.S.; Machado, P.F.L.; Ferreira, V.F. Gerenciamento de resíduos químicos em instituições de ensino e pesquisa. **Química Nova**, v. 28, n. 1, 2005.

Huo, J.; Peng, C. Depletion of natural resources and environmental quality; prospects of energy use, energy imports, and economic growth hindrances. **Resources Policy**, v. 86, 104049, 2023.

Jardim, W.F. Gerenciamento de resíduos químicos em laboratórios de ensino e pesquisa. **Química Nova**, v.21, n. 5, p. 671-673, 1998.

Lassali, T.A.F.; Diniz, R.B.; Cárnio, E.C.; Bonato, P.S.; Larson, R.E.; Giovani, W.F. Gerenciamento de resíduos químicos – Normas e procedimentos gerais, 2013. Disponível em: http://www.pcarp.usp.br/pages/lrq/pdf/normas_gerenciamento.pdf. Pesquisado em 20/10/2024.

Marinho, C.C.; Bozelli, R.L.; Esteves, F.A.; Gonçalves, A.C.B.; Rocha, V.A.; Silva, W.H.; Afonso, J.C. Gerenciamento de resíduos químicos em um laboratório de ensino e pesquisa: a experiência do laboratório de Limnologia da UFRJ. **Eclética Química**, v. 36, n. 2, p. 85-104, 2011.

Mistura, C.N.; Vaniel, A.P.H.; Linck, M.R. Gerenciamento de resíduos dos laboratórios de ensino de Química da Universidade de Passo Fundo, RS. **Revista CIATEC-UPF**, v. 2, n. 1, p. 54-64, 2010.

Moreira, F.R.; Moreira, J.C. A cinética do chumbo no organismo humano e sua importância para a saúde. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 9, n. 1, p. 167-181, 2004.

Murano, M.R.; Tavares, S.F. Analysis of Brazilian public policies related to the implementation of circular economy in civil construction. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 2, p. 129-142, 2022.

Phrophayak, J.; Techarungruengsakul, R.; khotdee, M.; Thuangchon, S.; Ngamsert, R.; Prasanchum, H.; Sivanpheng, O.; Kangrang, A. Enhancing green university practices through effective waste management strategies. **Sustainability**, v. 16, n. 8, p. 3346-3357, 2024.

Reed, B.E.; Robertson, J.; Jamil, M. Regeneration of granular activated Carbon (GAC) columns used for removal of lead. **Journal of Environmental Engineering**, v. 121, n. 9, p. 653-661, 1995.

Sassiotto, M.L.P. **Manejo de resíduos de laboratórios químicos em universidades: Estudo de caso do Departamento de Química da UFSCar**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005, Dissertação de Mestrado.

Silva, A.F.; Soares, T.R.D.S.; Afonso, J.C. Gestão de Resíduos de Laboratório: Uma Abordagem para o Ensino Médio. **Química Nova na Escola**, v. 32, n. 1, p. 55-65, 2010.

Silva, T.T.L.; Costa, E.C.S.; Santos, C.P.F. Tratamento e recuperação de resíduos de chumbo e íons cromato gerados no Laboratório de Ensino de Química Analítica do Centro de Educação e Saúde da Universidade Federal de Campina Grande. In: **5º Congresso Norte-Nordeste de Química**. Natal-RN, upload/1362538567, 2013.

Stichlmair, J.G.; Fair, J.R. **Distillation: Principles and Practice**. New York-USA, Editor Wiley-VCH. 1998.

Tavares, G.A.; Bendassolli, J.A; Implantação de um programa de gerenciamento de resíduos químicos e águas servidas nos laboratórios de ensino e pesquisa no CENA/USP. **Química Nova**, v. 28, n. 4, p. 732-738, 2005.

Vaz, C.R.; Fagundes, A.B.; Oliveira, I.L.; Kovaleski, J.L.; Selig, P.M. Sistema de gestão ambiental em Instituições de Ensino Superior: uma revisão. **GEPROS: Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 5, n. 3, p. 45-58, 2010.

Wilde, B. **Analytical Chemistry: Quantitative and Qualitative Analysis**. NY Research Press, 2018. ISBN: 9781632385642; ISBN-10: 1632385643.

NÚMEROS COMPLEXOS NAS CIÊNCIAS EXATAS E NA ENGENHARIA ELÉTRICA

Data de submissão: 07/11/2024

Data de aceite: 02/12/2024

Thiago Daboit Roberto

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- UERJ
Rio de Janeiro, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2694615438248688>

Isabelle Ferreira Pesset

Universidade Veiga de Almeida - UVA
Rio de Janeiro - RJ
<http://lattes.cnpq.br/2406388882407891>

Edísio Alves de Aguiar Junior

Universidade Veiga de Almeida - UVA
Rio de Janeiro - RJ
<http://lattes.cnpq.br/7977581823883152>

Maximiano Correia Martins

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- UERJ
Rio de Janeiro - RJ
<http://lattes.cnpq.br/3232700055302552>

Thiago Corrêa Almeida

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- UERJ
Rio de Janeiro - RJ
<http://lattes.cnpq.br/3266404381934797>

André Pereira de Almeida

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- UERJ
Rio de Janeiro - RJ
<http://lattes.cnpq.br/6871464920281079>

RESUMO: Este capítulo aborda a importância dos números complexos na Engenharia Elétrica, com foco em suas aplicações em circuitos de corrente alternada e na análise de sinais. Inicialmente, são apresentados os conceitos fundamentais e as representações cartesianas e polares, destacando como essas formas facilitam cálculos de magnitude e fase em fenômenos oscilatórios. Em seguida, exploram-se as aplicações práticas dos números complexos em circuitos RLC, onde a representação de impedância complexa permite uma análise precisa de defasagens e frequências. Ferramentas computacionais, como Geogebra e CircuitLab, são discutidas como recursos didáticos eficazes, pois oferecem simulações e visualizações interativas que ajudam a superar barreiras de aprendizado. Por fim, o capítulo sugere estratégias para aprimorar o ensino de números complexos, incentivando o uso de abordagens visuais e colaborativas que promovam uma compreensão prática e sólida entre futuros engenheiros.

PALAVRAS-CHAVE: Números complexos, Engenharia Elétrica, Circuitos RLC, Impedância, Ferramentas computacionais.

COMPLEX NUMBERS IN EXACT SCIENCES AND ELECTRICAL ENGINEERING

ABSTRACT: This chapter explores the importance of complex numbers in Electrical Engineering, focusing on their applications in alternating current circuits and signal analysis. Initially, fundamental concepts and Cartesian and polar representations are presented, highlighting how these forms facilitate calculations of magnitude and phase in oscillatory phenomena. Practical applications of complex numbers in RLC circuits are then examined, where complex impedance representation allows for precise analysis of phase shifts and frequencies. Computational tools, such as Geogebra and CircuitLab, are discussed as effective educational resources, providing interactive simulations and visualizations that help overcome learning barriers. Finally, the chapter suggests strategies to enhance the teaching of complex numbers, encouraging the use of visual and collaborative approaches that foster practical and robust understanding among future engineers.

KEYWORDS: Complex numbers, Electrical Engineering, RLC circuits, Impedance, Computational tools.

1 | INTRODUÇÃO

Os números complexos são fundamentais na Engenharia Elétrica e em outras áreas das ciências exatas, pois facilitam a análise de sistemas com grandezas que variam em amplitude e fase, como sinais e circuitos de corrente alternada. O conceito de número complexo foi introduzido historicamente para resolver equações polinomiais sem raízes reais e está baseado na unidade imaginária j , onde $j^2 = -1$ (FINE; ROSENBERGER, 1997). Esse formalismo se tornou indispensável para representar grandezas que exigem mais de uma dimensão para sua interpretação, como oscilações em circuitos elétricos (SADIKU, 2007).

No contexto da Engenharia Elétrica, os números complexos permitem simplificar operações que envolvem fenômenos de defasagem em circuitos com resistores, capacitores e indutores, facilitando a manipulação algébrica de grandezas oscilatórias, como tensão e corrente alternadas. Em circuitos RLC, por exemplo, a representação de tensões e correntes no plano complexo possibilita o cálculo preciso de impedâncias e a análise das relações de fase entre as variáveis, otimizando a resolução de problemas de maneira prática e eficiente (VIEIRA; PINTER, 2019).

Embora a aplicação dos números complexos seja essencial para a formação em Engenharia, muitos estudantes apresentam dificuldades em compreender e manipular esses conceitos, principalmente devido à falta de familiaridade com o número imaginário e à dificuldade em visualizar operações no plano complexo (NORDLANDER; NORDLANDER, 2012). Estudos indicam que, embora o tema seja introduzido no ensino médio, existem lacunas significativas no aprendizado, e os materiais didáticos muitas vezes oferecem uma abordagem limitada sobre o uso prático dos números complexos em problemas reais (JÚNIOR, 2016; OPPENHEIM; VERGHESE, 2015).

Diante dessas dificuldades, o uso de ferramentas computacionais, como o Geogebra e o CircuitLab, mostra-se promissor, pois proporciona visualizações interativas que facilitam a compreensão das operações no plano complexo e a interpretação de fenômenos de defasagem. Essas plataformas permitem que estudantes de engenharia explorem conceitos teóricos de maneira prática e visual, promovendo uma compreensão mais intuitiva e aplicável do tema.

Este capítulo, portanto, aborda a relevância dos números complexos na Engenharia Elétrica, explorando desde suas bases conceituais até suas aplicações práticas em circuitos elétricos. Além disso, são discutidas estratégias pedagógicas para melhorar o aprendizado, com foco no uso de ferramentas visuais e metodologias didáticas que tornam o ensino dos números complexos mais acessível e eficaz.

2 | CONCEITOS FUNDAMENTAIS E REPRESENTAÇÃO GRÁFICA

Os números complexos surgiram como uma extensão dos números reais, criados para resolver equações polinomiais que não possuem soluções no conjunto dos reais. A unidade imaginária, permite construir números complexos da forma $z=a+bj$, em que a é a parte real e b é a parte imaginária do número complexo z . Esse tipo de representação, chamado de forma algébrica, é amplamente utilizado em cálculos que envolvem sinais e fenômenos oscilatórios na Engenharia Elétrica (FINE; ROSENBERGER, 1997).

A introdução dos números complexos se torna especialmente relevante ao lidar com funções cujas raízes não pertencem ao conjunto dos números reais. A Figura 1, por exemplo, representa graficamente a função $f(x)=x^2+1$, que não cruza o eixo x no plano real, indicando a necessidade de uma extensão para o plano complexo para que suas raízes possam ser determinadas.

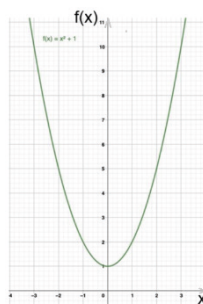


Figura 1: Exemplo de função complexa.

Na Engenharia Elétrica, os números complexos são essenciais para representar grandezas que variam em amplitude e fase, como a tensão e a corrente alternada em circuitos elétricos (SADIKU, 2007). Operações que envolvem esses sinais periódicos, e que exigem a manipulação de defasagens e frequências, são simplificadas com o uso dos

números complexos, permitindo uma abordagem visual e algébrica para fenômenos que, de outra forma, exigiriam cálculos trigonométricos complexos (BOYLESTAD, 2013).

2.1 Representação Cartesiana e Polar

No plano complexo, a visualização dos números complexos é feita com o eixo horizontal representando a parte real e o eixo vertical representando a parte imaginária de z . A representação gráfica dos números complexos no plano facilita a compreensão e a execução de operações básicas, como a soma e a subtração, que podem ser realizadas somando-se as partes reais e imaginárias separadamente.

Na forma $z = a + bj$, os números complexos são facilmente manipuláveis para operações de soma e subtração. Para somar dois números complexos $z_1 = a_1 + b_1j$ e $z_2 = a_2 + b_2j$, basta somar as partes reais e imaginárias, como:

$$z_1 + z_2 = (a_1 + a_2) + (b_1 + b_2)j \quad (1)$$

A Figura 2 apresenta a representação cartesiana de um número complexo, destacando a visualização das partes real e imaginária, o que facilita a compreensão dessas operações.

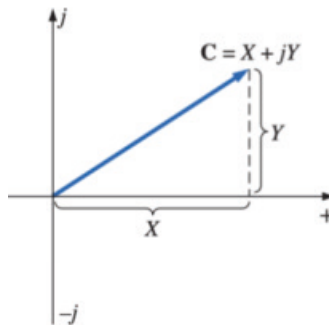


Figura 2: Representação cartesiana de um número complexo.

Em algumas operações, como multiplicação e divisão, a forma polar é mais adequada, pois permite descrever z em termos de sua magnitude $|z|$ e ângulo θ . A forma polar de z é dada por:

$$z = |z| (\cos\theta + j\sin\theta) = |z| e^{j\theta} \quad (2)$$

onde $|z| = \sqrt{a^2 + b^2}$ é a magnitude e $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right)$ é o ângulo de fase. Esta representação é conveniente para operações de multiplicação e divisão, pois as magnitudes dos números são multiplicadas (ou divididas) e os ângulos são somados (ou subtraídos), simplificando a análise.

A Figura 3 ilustra a representação polar de um número complexo no plano complexo, destacando a relação entre a magnitude e o ângulo. Essa figura ajuda a explicar visualmente

por que a forma polar é vantajosa em operações que envolvem rotação e escala, comuns em problemas de Engenharia Elétrica.

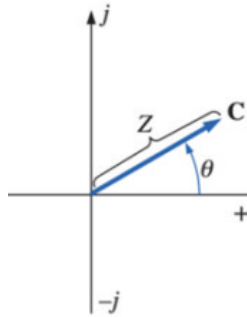


Figura 3: Representação polar de um número complexo no plano complexo.

Além disso, no plano complexo, a multiplicação de um número por j corresponde a uma rotação de 90° no sentido anti-horário, característica essencial para o estudo de circuitos com componentes que introduzem defasagens, como capacitores e indutores.

2.2 Importância das Representações na Engenharia Elétrica

A versatilidade entre as representações algébrica e polar é uma característica que torna os números complexos particularmente úteis na Engenharia Elétrica. Em circuitos de corrente alternada (CA), onde tensões e correntes oscilam com o tempo, o uso da forma polar simplifica o cálculo de variáveis importantes, como a impedância e a defasagem.

Por exemplo, em um circuito RLC série, a impedância total Z pode ser expressa como:

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (3)$$

onde R é a resistência, L é a indutância, C é a capacitância e ω é a frequência angular da fonte de tensão. Esse modelo de impedância em forma complexa permite entender rapidamente como cada componente afeta a fase e a magnitude da corrente e da tensão, simplificando análises que seriam mais complicadas com representações puramente trigonométricas (VIEIRA; PINTER, 2019).

Em resumo, o uso dos números complexos não apenas facilita cálculos em problemas de Engenharia Elétrica, mas também permite a visualização intuitiva de fenômenos oscilatórios e de defasagem, contribuindo para o entendimento completo de fenômenos que exigem análises em duas dimensões.

3 | APLICAÇÕES DOS NÚMEROS COMPLEXOS EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Na Engenharia Elétrica, os números complexos são amplamente utilizados para representar e resolver problemas que envolvem grandezas alternadas, como a tensão e a corrente em sistemas de corrente alternada (CA). Os números complexos permitem descrever tanto a magnitude quanto a fase dessas grandezas, simplificando a análise de circuitos elétricos com componentes que introduzem defasagens, como resistores, capacitores e indutores (SADIKU, 2007).

3.1 Análise de Circuitos RLC com Impedância Complexa

Em circuitos de corrente alternada com resistores, indutores e capacitores (conhecidos como circuitos RLC), os componentes introduzem defasagens específicas entre a tensão e a corrente. A resistência (R) causa uma resposta em fase, enquanto o capacitor (C) e o indutor (L) produzem defasagens de -90° e $+90^\circ$, respectivamente, na corrente em relação à tensão. Os números complexos são fundamentais para representar essas relações de forma simplificada e precisa.

A impedância complexa Z descreve a resistência total que um circuito apresenta a uma corrente alternada, levando em conta as contribuições de cada componente (BOYLESTAD, 2013). Para um circuito RLC série, a impedância foi dada pela Equação (3).

A representação complexa da impedância é vantajosa porque permite combinar as contribuições de cada componente de forma direta.

3.2 Fasores e Representação no Plano Complexo

Para representar grandezas alternadas, como tensão e corrente em circuitos CA, utiliza-se o conceito de fasores, que são vetores rotativos representados no plano complexo. Um fasor é uma representação complexa de uma grandeza senoidal, onde a magnitude do vetor corresponde à amplitude da onda senoidal e o ângulo de fase indica sua posição no ciclo.

Por exemplo, para uma tensão $V(t) = V_0 \cos(\omega t + \phi)$ o fasor correspondente é $V = V_0 e^{j\phi}$, onde V_0 é a amplitude e ϕ é o ângulo de fase. Isso permite representar a tensão como uma grandeza complexa estática no plano complexo, facilitando a soma e subtração de ondas senoidais defasadas, operações que seriam mais complexas se realizadas apenas com funções trigonométricas.

3.3 Aplicação Prática: Exemplo de Cálculo de Corrente em Circuito RLC

Em um circuito RLC série com uma fonte de tensão alternada, a corrente I que circula pelo circuito pode ser determinada pela Lei de Ohm generalizada para impedâncias:

$I = \frac{V}{Z}$. Supondo que a tensão da fonte é $V = V_0 e^{j\phi}$, e a corrente pode ser obtida pela divisão do fasor de tensão pela impedância complexa:

$$I = \frac{V_0 e^{j\phi}}{Z} = \frac{V_0}{|Z|} e^{j(\theta - \phi)} \quad (4)$$

Esse cálculo fornece a amplitude da corrente e a defasagem relativa entre tensão e corrente, um aspecto essencial em circuitos CA, onde diferentes componentes (R, L, C) introduzem defasagens específicas na corrente em relação à tensão de entrada.

3.4 Transformadas e Frequências em Análise de Sinais

Os números complexos também são fundamentais na análise de sinais em Engenharia Elétrica, especialmente em transformadas como a de Fourier, que decompõe um sinal no domínio do tempo em suas componentes de frequência. A transformada de Fourier é amplamente utilizada para analisar e projetar sistemas de comunicação e controle, onde as frequências e as fases dos sinais determinam o comportamento do sistema.

A Figura 4 ilustra uma Transformada de Fourier de um sinal, mostrando a decomposição do sinal original em suas componentes reais e imaginárias no domínio da frequência. Essa representação é essencial para entender a aplicação dos números complexos na análise de sinais, onde cada componente de frequência pode ser representada como um fasor com sua própria magnitude e fase.

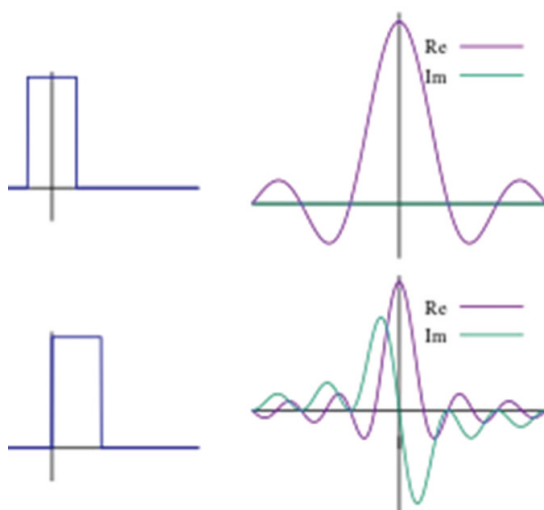


Figura 4: Exemplo de Transformada de Fourier no domínio da frequência.

4 | FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS COMO APOIO DIDÁTICO

Uma das principais dificuldades no aprendizado dos números complexos é a abstração envolvida em conceitos como o número imaginário e a interpretação de operações no plano complexo. Ferramentas computacionais oferecem suporte didático valioso ao permitir a visualização interativa de operações complexas e a simulação de fenômenos, que ajudam os estudantes a entenderem melhor os conceitos.

4.1 Geogebra

O Geogebra é uma ferramenta amplamente utilizada para visualização gráfica e apoio didático em áreas como álgebra, cálculo e geometria. Para o ensino de números complexos, o Geogebra possibilita a criação de representações visuais que mostram as operações no plano complexo, ajudando a tornar mais concretos os conceitos de soma, subtração, multiplicação e rotação.

Uma aplicação comum no Geogebra é a representação de operações básicas com números complexos, como a soma e a multiplicação, permitindo que os alunos visualizem diretamente no plano complexo as mudanças de magnitude e fase. A Figura 5 apresenta uma visualização da soma de dois números complexos no Geogebra, demonstrando a simplicidade dessa operação gráfica, o que ajuda na compreensão dos resultados de uma soma algébrica.

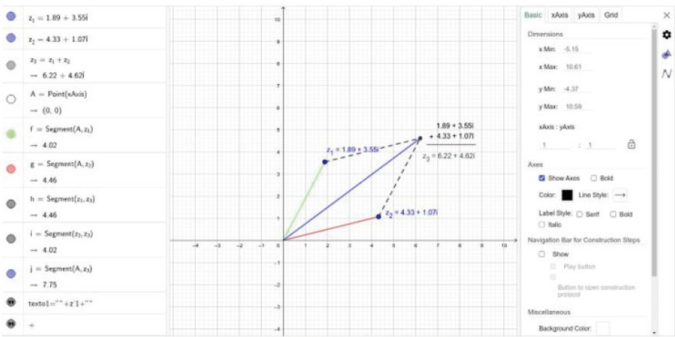


Figura 5: Exemplo de soma de números complexos no Geogebra.

Além disso, o Geogebra permite a visualização de rotações e outras operações que ilustram como a multiplicação por um número complexo afeta o ângulo e a magnitude no plano complexo.

4.2 CircuitLab

Enquanto o Geogebra é ideal para a visualização de operações algébricas no plano complexo, o CircuitLab é uma ferramenta focada em simulação de circuitos elétricos, tanto analógicos quanto digitais. O CircuitLab permite que estudantes montem e analisem circuitos de corrente alternada, fornecendo uma representação visual das respostas de amplitude e fase das tensões e correntes nos diferentes componentes.

Para estudantes de Engenharia Elétrica, o CircuitLab é particularmente útil na análise de circuitos RLC, onde as defasagens causadas pelos elementos resistivos, indutivos e capacitivos afetam as grandezas de tensão e corrente. Por exemplo, a Figura 6 mostra a simulação de um circuito RLC no CircuitLab, onde o comportamento da tensão e da corrente é exibido no domínio do tempo, oferecendo uma visão realista dos efeitos de fase e amplitude em cada componente do circuito.

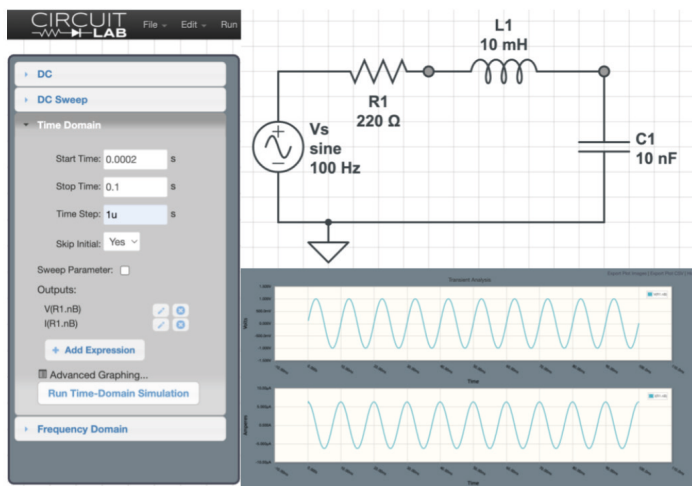


Figura 6: Simulação de um circuito RLC com fonte senoidal no CircuitLab.

Outra funcionalidade relevante do CircuitLab é a possibilidade de visualizar a resposta dos circuitos no domínio da frequência. A Figura 7 ilustra a resposta em frequência de um circuito RLC, com a amplitude e fase das tensões apresentadas para diferentes frequências. Esta representação é fundamental para o entendimento de fenômenos de ressonância e comportamento de frequência em sistemas elétricos, conceitos que exigem uma compreensão detalhada das operações com números complexos.

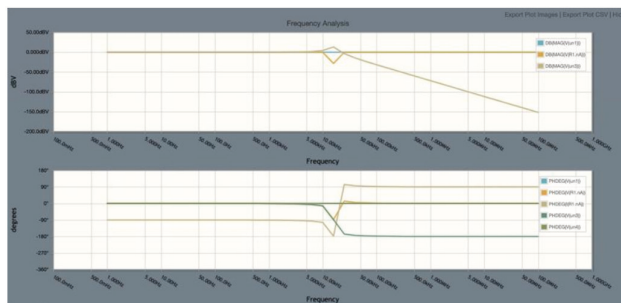


Figura 7: Domínio da frequência: Amplitude e fase da tensão ao longo dos elementos do circuito RLC.

4.3 Benefícios para o Aprendizado

O uso de ferramentas como o Geogebra e o CircuitLab proporciona uma série de benefícios ao aprendizado dos números complexos. Entre os principais estão:

Visualização Interativa: A visualização gráfica e interativa ajuda os alunos a entenderem operações abstratas, como rotações e multiplicações complexas, de uma forma concreta e visual.

Ferramentas como o CircuitLab simulam circuitos reais e permitem que os alunos observem o comportamento dinâmico das grandezas elétricas em função da frequência e do tempo, conectando a teoria dos números complexos com aplicações práticas.

Essas plataformas possibilitam que os estudantes explorem conceitos por conta própria, desenvolvendo a intuição e o entendimento conceitual de maneira autônoma.

A aplicação de ferramentas computacionais contribui significativamente para superar barreiras no aprendizado dos números complexos, proporcionando uma abordagem visual que é muitas vezes mais intuitiva e eficaz do que métodos tradicionais. Além disso, o uso de simulações e representações interativas alinha-se com metodologias modernas de ensino, que priorizam a construção do conhecimento por meio de experimentação e exploração.

5 | DESAFIOS E ESTRATÉGIAS NO ENSINO DE NÚMEROS COMPLEXOS

O aprendizado dos números complexos apresenta desafios significativos para muitos estudantes, especialmente em áreas como a Engenharia Elétrica, onde esses conceitos são aplicados de forma prática. As dificuldades enfrentadas por estudantes incluem desde a compreensão básica do conceito de número imaginário até a visualização e manipulação de operações algébricas e trigonométricas no plano complexo. Pesquisas indicam que essas dificuldades são comuns tanto entre alunos quanto entre docentes, e que há uma necessidade de metodologias de ensino mais eficazes (NORDLANDER; NORDLANDER, 2012; CAGLAYAN, 2016).

5.1 Principais Dificuldades de Compreensão

Uma das principais barreiras no aprendizado dos números complexos é a dificuldade de aceitar e interpretar o conceito de unidade imaginária, e de visualizar as operações envolvendo números complexos. Segundo estudos, muitos alunos classificam os números complexos como uma construção abstrata de difícil compreensão e apresentam dificuldades em ver a aplicação prática desses conceitos (CHAVEZ, 2014).

Outro aspecto crítico é a visualização do plano complexo e a conexão entre operações algébricas e suas interpretações geométricas. A compreensão das representações polar e cartesiana, assim como a interpretação de ângulos de fase e magnitude, muitas vezes requer uma capacidade de abstração que muitos alunos ainda não desenvolveram completamente.

5.2 Estratégias Didáticas para Melhorar a Compreensão

Para lidar com essas dificuldades, diversas estratégias didáticas têm sido propostas com o objetivo de tornar o ensino de números complexos mais acessível e prático. Entre as principais estratégias estão:

Como discutido na seção anterior, o uso de ferramentas como Geogebra e CircuitLab proporciona uma abordagem visual que ajuda os alunos a entenderem as operações no plano complexo. Essas plataformas permitem que os estudantes visualizem as transformações geométricas resultantes de operações com números complexos, como rotações e mudanças de magnitude, o que facilita a compreensão intuitiva dos conceitos.

Apresentar o desenvolvimento histórico dos números complexos pode ajudar os estudantes a entenderem a motivação por trás desse conceito. Discutir como os números complexos foram criados para resolver equações sem raízes reais e como se provaram úteis em áreas como a Física e a Engenharia ajuda a situar o aprendizado no contexto das aplicações práticas.

Ao conectar números complexos a representações visuais e compará-los a conceitos familiares (como rotações no plano e vetores), é possível construir uma ponte entre o conhecimento prévio dos estudantes e os novos conceitos. Essas analogias podem simplificar a transição do aprendizado abstrato para a aplicação prática, especialmente em disciplinas que exigem interpretação geométrica dos números complexos (JÚNIOR, 2016).

Trabalhar com problemas aplicados à Engenharia, como cálculos de impedância e análise de defasagens em circuitos de CA, ajuda os estudantes a entenderem o valor prático dos números complexos. A prática com exercícios que envolvem o uso de fasores e transformadas no contexto de sinais e sistemas facilita a transição do conceito abstrato para a aplicação técnica e real.

5.3 Integração de Repositórios de Recursos Visuais

A criação de repositórios colaborativos e plataformas de compartilhamento de projetos, como o perfil público no Geogebra, possibilita que professores e alunos acessem conteúdos desenvolvidos para visualização de números complexos em circuitos e sinais. Tais recursos visuais facilitam o aprendizado ao oferecer uma abordagem interativa e prática. A Figura 8 exemplifica um repositório de conteúdo colaborativos no Geogebra, onde projetos e aplicações desenvolvidos para visualização de números complexos podem ser compartilhados entre docentes e discentes, promovendo o aprendizado ativo e colaborativo.

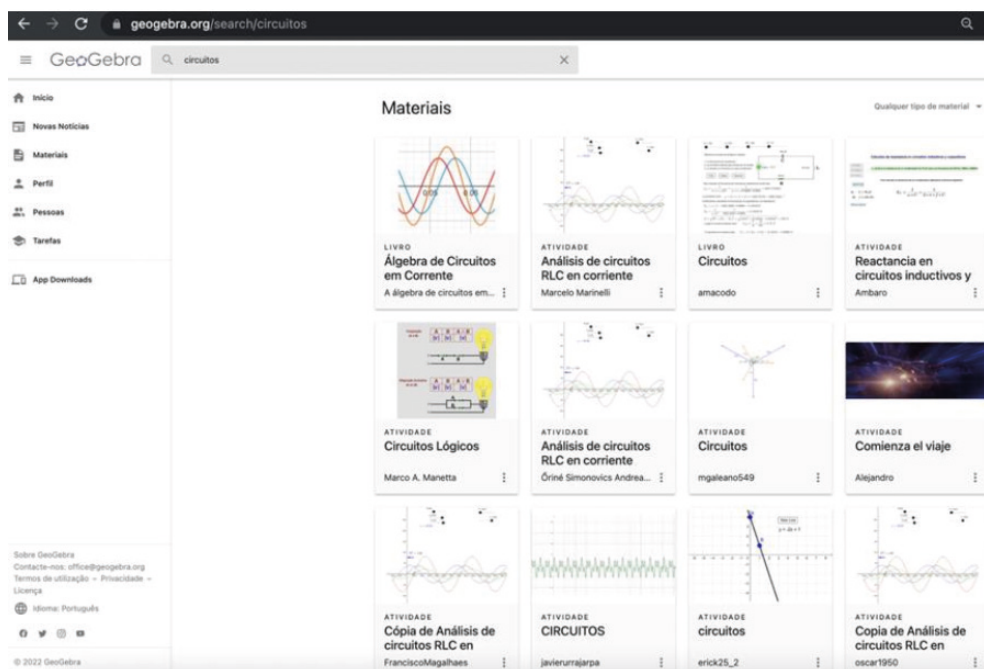


Figura 8: Repositório de conteúdo colaborativos no Geogebra.

Essa estratégia incentiva o aprendizado autônomo e a exploração prática, promovendo uma compreensão mais profunda e integrada dos conceitos. Professores podem, inclusive, sugerir que os alunos desenvolvam seus próprios projetos de visualização, contribuindo para o repositório e fortalecendo a conexão entre teoria e prática.

5.4 Benefícios de uma Abordagem Visual e Interativa

Estudos mostram que os alunos que utilizam ferramentas visuais e interativas, em combinação com as abordagens descritas acima, apresentam uma compreensão mais sólida e intuitiva dos números complexos (NORDLANDER; NORDLANDER, 2012). Esse

tipo de abordagem não apenas facilita a interpretação geométrica e prática dos conceitos, mas também melhora a retenção e a habilidade de aplicar os números complexos em problemas de engenharia. Além disso, o uso de plataformas interativas permite que os alunos experimentem e explorem conceitos de forma autônoma, fortalecendo seu entendimento e desenvolvendo uma intuição valiosa para o aprendizado avançado.

6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os números complexos são fundamentais na Engenharia Elétrica, facilitando a análise de grandezas oscilatórias e defasagens, especialmente em circuitos de corrente alternada e na análise de sinais. Com representações que capturam magnitude e fase, eles simplificam cálculos de impedância e operações envolvendo fases.

Este capítulo discutiu tanto suas aplicações práticas quanto os desafios de aprendizado, propondo estratégias como o uso de ferramentas visuais (Geogebra e CircuitLab) e métodos de ensino interativos. Essas abordagens tornam os conceitos abstratos mais acessíveis e aplicáveis.

Ao integrar essas abordagens visuais e interativas, espera-se que futuros engenheiros adquiram uma compreensão sólida e intuitiva dos números complexos, aplicável a uma variedade de problemas em Engenharia Elétrica e outras áreas das ciências exatas. Esse enfoque pedagógico oferece aos alunos as ferramentas para compreenderem melhor os fenômenos de fase e amplitude, promovendo uma formação mais completa e prática.

REFERÊNCIAS

BOYLESTAD, R. L. **Introductory Circuit Analysis**. 13. ed. Boston: Pearson, 2013.

CAGLAYAN, G. **Visualization of complex roots of unity in dynamic geometry environments**. Teaching Mathematics and Its Applications, v. 35, n. 2, p. 78-90, 2016.

CHAVEZ, E. G. **Teaching and learning complex numbers at secondary level: An analysis**. Educational Studies in Mathematics, v. 85, n. 3, p. 415-432, 2014.

FINE, B.; ROSENBERGER, G. **The Fundamental Theorem of Algebra**. New York: Springer, 1997.

JÚNIOR, M. L. A. **Uso de números complexos na engenharia elétrica: dificuldades e estratégias de ensino**. Revista Brasileira de Ensino de Engenharia, v. 34, n. 2, p. 254-265, 2016.

NORDLANDER, M. C.; NORDLANDER, E. **Understanding complex numbers in electrical engineering education: A study on visualization and symbol manipulation**. Journal of Engineering Education, v. 101, n. 3, p. 367-375, 2012.

OPPENHEIM, A. V.; VERGHESE, G. C. **Signals, Systems, and Inference**. Boston: Pearson, 2015.

SADIKU, M. N. O. **Fundamentals of Electric Circuits**. 4. ed. Boston: McGraw-Hill, 2007.

VIEIRA, B. C.; PINTER, S. R. da R. **Comparação entre representações algébrica e trigonométrica de números complexos em circuitos CA**. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Elétrica, v. 15, p. 78-83, 2019.

REVISÃO SOBRE MÉTODOS NUMÉRICOS PARA SOLUÇÕES APROXIMADAS DE EQUAÇÕES DE MECÂNICA DOS FLUIDOS

Data de submissão: 05/12/2024

Data de aceite: 02/12/2024

Clézio Abilio dos Santos

Centro Universitário das Faculdades
Integradas de Ourinhos-UNIFIO
Ourinhos-São Paulo
<https://lattes.cnpq.br/9185139318984924>

Kamira Miksza Frago

Centro Universitário das Faculdades
Integradas de Ourinhos-UNIFIO
Ourinhos-São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/8973135701360405>

RESUMO: Na vida real, a solução de problemas que envolvem diversos fenômenos é de difícil solução analítica, isso inclui os fenômenos que envolvem fluidos. Dentre eles, pode-se citar uma usina hidrelétrica, ou até mesmo em nossas casas com o saneamento básico, mas infelizmente diversos fenômenos que incluem líquidos ou gases não possuem solução analítica, sendo necessário buscar por soluções numéricas, que darão um resultado aproximado. O presente trabalho tem como objetivo apresentar alguns métodos numéricos que podem ser utilizados para encontrar soluções aproximadas para equações que envolvem fluidos. Os métodos que serão apresentados

são o método de Euler, método das diferenças finitas e o método dos elementos finitos, que são métodos muito utilizados para a solução de problemas envolvendo a mecânica dos fluidos.

PALAVRAS-CHAVE: Método de Euler; Diferenças Finitas; Elementos Finitos; Volumes Finitos; Fluidos.

REVIEW ABOUT NUMERICAL METHODS FOR APPROXIMATE SOLUTIONS OF FLUID MECHANICS EQUATIONS

ABSTRACT: In real life, solving problems involving various phenomena is difficult to solve analytically, this includes phenomena involving fluids. Among them, we can mention a hydroelectric plant, or even in our homes with basic sanitation, but unfortunately several phenomena that include liquids or gases do not have an analytical solution, making it necessary to search for numerical solutions, which will give an approximate result. The present work aims to present some numerical methods that can be used to find approximate solutions for equations involving fluids. The methods that will be presented are the Euler method, the finite difference method and the finite element

method, which are widely used methods for solving problems involving fluid mechanics.

KEYWORDS: Euler method; Finite Differences; Finite Elements; Finite Volumes; Fluids.

INTRODUÇÃO

Em muitos problemas envolvendo fluidos é interessante realizar uma análise diferencial, que consiste em estudar todos os pontos de uma região de escoamento. Em uma seção de volumes infinitesimais, onde no limite, tendendo a quantidade de volumes infinitos, o tamanho do volume tende a um ponto (Çengel, 2015).

Para realizar uma análise diferencial, a fim de encontrar soluções para uma equação, é importante especificar as condições de contorno, em toda a fronteira do domínio de escoamento. (Çengel, 2015).

Infelizmente muitas equações, como por exemplo as equações de Navier-Stokes ou ainda a equação de Colebrook, não possuem solução analítica, sendo necessário a utilização de métodos numéricos para encontrar soluções aproximadas, a não ser em algumas situações que possuem campo de escoamento simples (Çengel, 2015). Assim, para resolução de equações complexas, utiliza-se a discretização do domínio, dando início a uma análise numérica. A discretização permite o uso computacional para tratamento das equações diferenciais. (Franco, 2012).

Em aplicações reais, diferente de idealizações, existem várias variáveis que influenciam no resultado de uma equação. Não é difícil perceber que estamos em um mundo que possui três dimensões, além de uma dimensão temporal, isso significa que, para formular alguma equação, ela possuirá quatro incógnitas, pelo menos, e as suas derivadas serão parciais, dando origem a equações diferenciais parciais.

As equações diferenciais parciais (EDP) são de maior complexidade do que equações diferenciais ordinárias (EDO), pois possuem mais variáveis e raramente possuem solução analítica (Franco, 2012). Isso não significa que todas as equações diferenciais ordinárias possuem solução analítica.

Métodos numéricos são usados para conseguir encontrar soluções aproximadas, e o presente trabalho tem por objetivo realizar uma revisão da literatura disponível sobre alguns destes métodos.

O primeiro é o método de Euler, que é o mais fácil, porém, a solução não possui muita qualidade, entretanto possui a sua importância teórica (Franco, 2012), e pode ser utilizado para resolução de EDO's.

O segundo método é o das diferenças finitas, que consiste em dividir o domínio em pontos discretizados, e substituir as derivadas por aproximações (Franco, 2012).

Por último, tem-se o método dos elementos finitos, que consiste em dividir o domínio em elementos. Ao se entender o comportamento de cada elemento de um conjunto, fica mais fácil entender o comportamento do domínio (Filho, 2009).

O presente trabalho possui a justificativa de ser necessário encontrar soluções para equações diferenciais onde não existe solução analítica, e isso inclui equações de mecânica dos fluidos. Assim sendo, é importante mostrar métodos numéricos para encontrar estas soluções, além de mostrá-las em algumas aplicações direcionadas à mecânica dos fluidos.

Soluções de equações diferenciais são muito úteis para várias aplicações, sendo então de interesse nas mais diversas áreas que elas se encontram.

Assim, o presente trabalho tem o objetivo de realizar uma revisão da literatura disponível sobre diferentes métodos numéricos para encontrar soluções aproximadas de equações diferenciais, e aplicá-las em mecânica dos fluidos. O levantamento bibliográfico será realizado utilizando ferramentas gratuitas de busca, como o google scholar.

METODOLOGIA

Serão demonstrados alguns métodos numéricos utilizados para resolver equações de mecânica dos fluidos, além de mostrar os resultados em tabelas e simulação em CFD (dinâmica dos fluidos computacional).

Na análise dos fluidos, se encontra grande quantidade de situações que possuem uma análise diferencial pois quando se trata, por exemplo, de escoamento, o fluido se desloca e seu comportamento varia pelas três dimensões espaciais e/ou pelo tempo, podendo assim originar equações diferenciais se tratando de um volume infinitesimal onde as variações são infinitesimais. Outro exemplo é no regime transiente, onde as características do fluido variam com o tempo podendo assim originar equações diferenciais.

Primeiro será apresentado o método de Euler em alguma equação de mecânica dos fluidos, a seguir o método dos elementos finitos, das diferenças finitas e por fim o método dos volumes finitos.

Para utilizar o método de Euler é necessário saber o valor inicial da variável independente e da variável dependente. Já para conseguir utilizar o método das diferenças finitas e dos elementos finitos, é necessário determinar os valores de contorno, que dependerá de como será feito o experimento (se será com velocidade inicial zero e o valor da velocidade final fixo, por exemplo).

No método dos elementos finitos são encontradas equações que descrevem os graus de liberdade do fluido a ser analisado.

Serão apresentados os métodos em equações de mecânica dos fluidos pois nela existem várias análises diferenciais, e isso inclui análises em regime transiente, onde as características do fluido variam com o tempo.

No presente trabalho serão demonstradas algumas aplicações dos métodos estudados em soluções aplicadas à problemas da mecânica dos fluidos, vindo de trabalhos científicos publicados que serão revisados para esse presente artigo, sendo esse um estudo teórico de revisão bibliográfica.

REVISÃO DA LITERATURA

Expressões matemáticas que possuem o símbolo de igual denominam-se equações. Equações diferenciais são equações que possuem derivadas em suas funções (Çengel, 2014).

Vários problemas encontrados nas engenharias possuem formulação que envolvem derivadas, originando assim equações diferenciais (Çengel, 2014). Infelizmente, muitas dessas equações diferenciais não possuem solução fácil, sendo necessário a utilização de métodos numéricos.

Um método fácil é o método de Euler, que terá sua demonstração apresentada a seguir:

Considere que as equações 1 e 2 são contínuas e diferenciáveis (Franco, 2012):

$$y' = f(x, y) \quad (1)$$

$$y(x_0) = y_0 \quad (2)$$

Considere $y(x)$ a solução exata. Utilizando série de Taylor para $y(x_n + h)$ em torno de x_n , obtemos a equação 3:

$$y(x_n + h) = y(x_n) + hy'(x_n) + \frac{h^2}{2!}y''(x_n) + \dots + \frac{h^q}{q!}y^{(q)}(x_n) + \frac{h^{q+1}}{(q+1)!}(\xi_n) \\ , x_n < \xi_n < x_n + h. \quad (3)$$

O último termo é o erro de truncamento local.

Truncando a expressão (3), depois de $(q + 1)$ termos, e, considerando que $y' = f(x, y)$, obtemos a equação 4:

$$y(x_n + h) = y(x_n) + hf(x_n, y(x_n)) + \dots + \frac{h^q}{q!}f^{(q-1)}(x_n, y(x_n)). \quad (4)$$

Substituindo $y(x_n)$ por y_n e $f(x_n, y(x_n))$ por f_n^j , obtemos:

$$y_{n+1} = y_n + hf_n + \frac{h^2}{2!}f_n' + \dots + \frac{h^q}{q!}f_n^{(q+1)}, \quad (5)$$

Esse é o método de Taylor de ordem q .

Fazendo-se $q = 1$ em (5), conseguimos a equação 6:

$$y_{n+1} = y_n + hf_n \quad (6)$$

Obtemos por último o método de Euler.

Considerando $q = 1$ em (3), teremos a fórmula progressiva do método das diferenças finitas, que usa a diferença progressiva e seu erro (Franco, 2012), mostrada na equação 7:

$$y'(x) = \frac{y(x+h)-y(x)}{h} - \frac{h}{2}y''(\xi), \xi \in (x, x+h) \quad (7)$$

De modo parecido, fazendo $-h$ em (3), mas continuando com $q = 1$, consegue a fórmula regressiva, que usa a diferença regressiva e seu erro (Franco,2012), conforme mostrado em 8:

$$y'(x) = \frac{y(x)-y(x-h)}{h} + \frac{h}{2}y''(\xi), \xi \in (x-h, x) \quad (8)$$

Agora considerando $q = 2$ em (3), e h e $-h$, respectivamente, obtemos a seguinte equação:

$$y(x_n + h) = y(x_n) + hy'(x_n) + \frac{h^2}{2!}y''(x_n) + \frac{h^3}{3!}y''' \quad (9)$$

$$y(x_n - h) = y(x_n) - hy'(x_n) - \frac{h^2}{2!}y''(x_n) - \frac{h^3}{3!}y'''$$

Calculando $y(x+h) - y(x-h)$, obtém-se a fórmula centrada que utilizada a diferença central e seu erro (Franco,2012), mostrada na equação 10:

$$y'(x) = \frac{y(x+h)-y(x-h)}{2h} + \frac{h^2}{3!}y'''(\xi) \quad (10)$$

Essas fórmulas obtidas do método das diferenças finitas podem ser aproximadas para derivadas parciais de funções de várias variáveis. Assim, segundo Franco (2012), e considerando u_t como derivada parcial de u em relação a t , temos as seguintes equações (11-13):

Progressiva:

$$u_t = \frac{u(x,t+k)-u(x,t)}{k} - \frac{k}{2}u_{tt}(x, \zeta), (t < \zeta < t+k) \quad (11)$$

Regressiva:

$$u_t(x, y) = \frac{u(x,t)-u(x,t-k)}{k} + \frac{k}{2}u_{tt}(x, \zeta), (t-k < \zeta < t) \quad (12)$$

Central de segunda ordem:

$$u_{xx}(x, t) = \frac{u(x+h,t)-2u(x,t)+u(x-h,t)}{h^2} - \frac{h^2}{12}u_{xxx}(\xi, t), \quad (13)$$

$$(x-h < \xi < x+h)$$

O método das diferenças finitas pode ser utilizado em situações 2d e 3d sendo ele recomendado para geometrias exatas sem muitas irregularidades, mas nada o impede de ser utilizado em geometrias exóticas.

Considere a equação 14:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + p \frac{\partial u}{\partial x} + p \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (14)$$

Pode-se utilizar diferença progressiva, regressiva ou central para aproximar a equação 14.

Considere a figura 1, nela percebe-se que deve-se reduzir muito o domínio nas bordas para a utilização do método de diferenças finitas, o que aumenta muito o custo computacional. Porém, utilizando um retângulo reto, tem-se uma aproximação melhor do resultado real, precisão essa que diminui com as irregularidades da malha que está tratando o método.

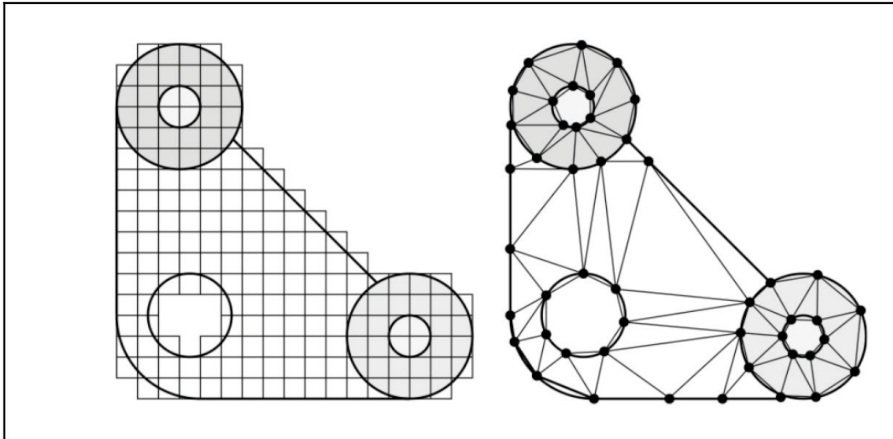


Figura 1 - Aproximações. (a) aproximação em diferenças finitas, e (b) em elementos finitos

Fonte: Métodos Numéricos para Engenharia

Com geometrias irregulares, a substituição do método das diferenças finitas pelo método dos elementos finitos, apresenta melhores valores de aproximação para tais geometrias. Na prática, isso significa que os resultados obtidos apresentam menos erros, o que se aproxima da realidade.

Ainda com base na figura 1, pode-se observar que em (b) existe uma melhor aproximação do que em (a). Os polinômios usados são em formato triangular.

Pode parecer estranho a utilização dos elementos finitos em mecânica dos fluidos, todavia existe formulação para isso, como por exemplo o método Petrov-Galerkin SUPG, uma formulação especial para a mecânica dos fluidos.

O método mais utilizado em fluidodinâmica é o método dos volumes finitos, pois ele possui uma característica que os outros métodos não possuem: Respeita a propriedade conservada das equações, pois ele faz um balanço, desta maneira considera todas as características de entrada e de saída no volume de controle considerado, não tendo criação ou destruição de nenhuma propriedade. Cabe ressaltar que por conta disso, o uso do método deve ser realizado para as equações em suas formas conservativas, caso contrário absurdos podem aparecer, como criação ou destruição de matéria, por exemplo.

O método dos elementos finitos consiste em subdividir o domínio em regiões simples. A solução do conjunto é obtida juntando as soluções individuais de cada parte (Chapra, 2016).

A relação existente entre as ações e os graus de liberdade são melhor expressos por meio de matriz. Assim (Filho,2009):

$$\{f\} = [k] \cdot \{u\} \quad (15)$$

Podemos, por exemplo, dividir em uma malha com triângulos o domínio de uma chapa bidimensional, como mostrado na figura 2:

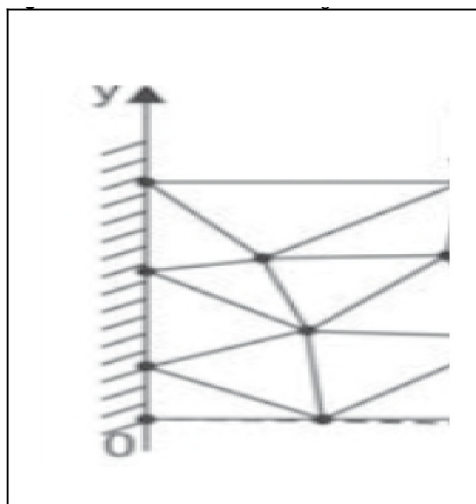


Figura 2- domínio em forma de triângulo

Fonte: Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE

Na imagem acima, cada ponto é um nó, que possui graus de liberdade.

Os graus de liberdade que compõem a matriz u , em uma situação bidimensional por exemplo, serão funções polinomiais, onde a potência dependerá da quantidade de graus de liberdade.

Os elementos finitos, apresentam solução manual trabalhosa, felizmente podem ser resolvidos com auxílio de programas computacionais.

Independente do problema que estiver sendo analisado, sempre será utilizado uma matriz (não necessariamente igual a (15)) que será resolvida iterativamente em um problema computacional.

Outra metodologia usada é o método dos resíduos ponderados. Uma metodologia simples, que consiste, de acordo com BRASIL, et al (2015), em uma formulação fraca, que é quando uma igualdade de equação diferencial que era para ser zero em todos os pontos do domínio não precisa ser em todos os pontos, mas sim em uma média ponderada, como na equação abaixo:

$$\int_0^L (R(x)W(x)) dx = 0 \quad (16),$$

onde $R(x)$ é o resíduo e $W(x)$ uma função de ponderação.

O método de Galerkin é basicamente quando a função peso $W(x)$ possui a mesma forma da função da equação que se quer achar a solução. A seguir será apresentado um exemplo do método. (Brasil et al, 2015).

Considere o seguinte problema:

$$\frac{du^2}{dx^2} + \frac{q}{EA} = 0, \text{ tal que } u(0) = 0 \text{ e } u'(L) = \frac{P}{EA} \quad (17)$$

Se for utilizado uma aproximação para a função u , então essa igualdade deixará de ser zero, mas apresentará um resíduo:

$$\frac{du^2}{dx^2} + \frac{q}{EA} = R(x) \quad (18)$$

Assim:

$$\int_0^L (R(x)W(x)) dx = 0 \quad (19)$$

Uma aproximação para u é:

$$u(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \phi_i(x) \quad (20)$$

ou, de forma finita:

$$u(x) = \alpha_i \phi_i(x) \quad (21)$$

A função que aproxima normalmente é polinomial.

Como dito anteriormente, a função peso tem a forma da função que procuramos, assim podemos definir como sendo:

$$w(x) = \beta_j \phi_j(x) \quad (22)$$

Substituindo:

$$\beta_j \int_0^L \left(\frac{du^2}{dx^2} + \frac{q}{EA} \right) \phi_j(x) dx = 0 \quad (23)$$

Que é satisfeito com:

$$\int_0^L \left(\frac{du^2}{dx^2} + \frac{q}{EA} \right) \phi_j(x) dx = 0 \quad (24)$$

Rearranjando e integrando por partes, integrando e arrumando, obtém-se:

$$EA \frac{d(u(x))}{dx} \phi_j(L) - \int_0^L EA \frac{d(u(x))}{dx} \frac{d(\phi_j)}{dx} dx + \int_0^L q \phi_j dx = 0 \quad (25)$$

$$\int_0^L EA \frac{d(u(x))}{dx} \frac{d(\phi_j)}{dx} dx = \int_0^L q \phi_j dx + P \phi_j(L) \quad (26)$$

Considerando a função de aproximação para u:

$$\alpha_i \int_0^L EA \frac{d(\phi_i)}{dx} \frac{d(\phi_j)}{dx} dx = \int_0^L q \phi_j dx + P \phi_j(L) \quad (27)$$

Agora define-se:

$$K_{ij} = \int_0^L EA \frac{d(\phi_i)}{dx} \frac{d(\phi_j)}{dx} dx \quad (28)$$

$$F_j = \int_0^L q \phi_j dx + P \phi_j(L) \quad (29)$$

Assim, chega-se na equação:

$$F = K\alpha \quad (30)$$

Onde a equação pode ser resolvida e colocada de forma matricial.

Agora, considere a seguinte equação (Ribeiro,2019):

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot (u\varphi) + \nabla \cdot (-k \nabla \varphi) = Q(x, y) \quad (31)$$

onde φ é a concentração da substância, $u\varphi$ é o fluxo convectivo e $k\nabla\varphi$ o fluxo difusivo (Ribeiro,2019).

Para esta situação, a formulação de Galerkin é mostrada abaixo (Ribeiro,2023):

$$\sum_{j=1}^n \int_{\Omega} (N_i N_j \frac{d\varphi}{dt} + N_i N_j \nabla \cdot u \varphi_j + N_i (u \cdot \nabla N_j) \varphi_j + (\nabla N_i \cdot k \nabla N_j) \varphi_j) d\Omega = \int_{\Omega} N_i Q d\Omega + \int_{\Gamma} N_i F d\Gamma \quad (32)$$

onde $F = k \nabla \varphi \cdot n$

Ou, de forma matricial:

$$M \frac{d\varphi}{dt} + K\varphi = F \quad (33)$$

A seguir é mostrada a formulação SUPG:

$$\int_{\Omega} R(\varphi) w d\Omega + A_{e=1}^{numel} \int_{\Omega_e} R(\varphi) \tau u \cdot \nabla w d\Omega \quad (34)$$

onde:

$$\tau = \frac{\xi h}{2|u|} \quad (35)$$

$$\xi = \cotanh(\alpha) - \frac{1}{\alpha} \quad (36)$$

$$\alpha = \frac{|u|h}{2||k||} \quad (37)$$

O método dos volumes finitos consiste basicamente em dividir o problema em quantidades pequenas e finitas de volume e realizar um balanço ou integração no volume (Maliska, 2004).

Nesse método também se utiliza normalmente diferenças centrais em algumas derivadas presentes (Maliska, 2004).

Como exemplo, considere a figura 3, onde realizaremos um balanço de propriedades (Maliska 2004):

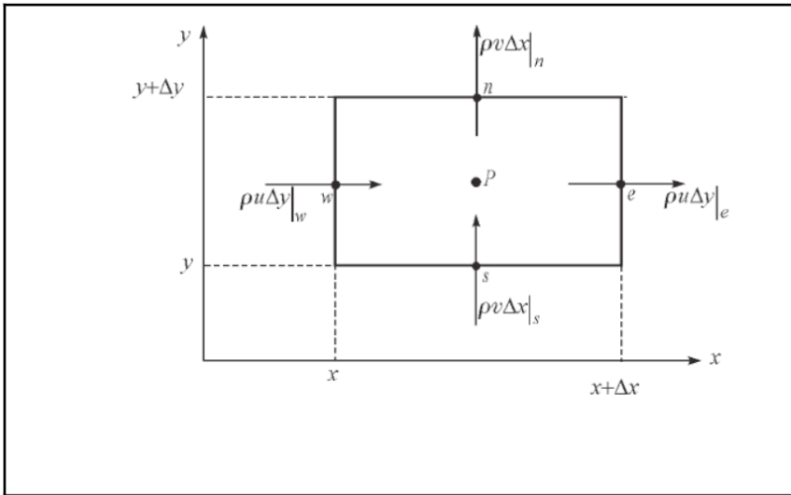


Figura 3 - Volume Elementar

Fonte: Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional

$$\frac{(\rho u)_e - (\rho u)_w}{\Delta x} + \frac{(\rho v)_n - (\rho v)_s}{\Delta y} = 0 \quad (38)$$

Após aplicar limite, obtemos:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (39)$$

E agora integrando o volume e considerando que o fluxo de massa é a média da variação, obtemos:

$$\rho u \Delta Y_e - \rho u \Delta Y_w + \rho v \Delta X_n - \rho v \Delta X_s = 0 \quad (40)$$

ou

$$\frac{dm_e}{dt} - \frac{dm_w}{dt} + \frac{dm_n}{dt} - \frac{dm_s}{dt} = 0 \quad (41)$$

Funções de Aproximação

Em relação às funções que aproximam os elementos, será mostrado dois tipos: um elemento triangular e outro retangular.

Em relação ao elemento triangular, ele pode possuir a característica de ser linear, como na equação 42 a seguir:

$$f(x, y) = a + bx + cy \quad (42)$$

Essa função deverá possuir o valor de 1 no nó de análise, e zero nos demais nós.

A mesma função pode ser generalizada para três dimensões, conforme pode-se observar na equação 43:

$$f(x, y, z) = a + bx + cy + dz \quad (43)$$

Onde a, b, c e d são constantes a determinar.

Usando-se dos polinômios de Lagrange pode-se obter os elementos para o caso quadrilátero:

$$N_i = l_i = \frac{(\xi - \xi_1)(\xi - \xi_2) \dots (\xi - \xi_{i-1})(\xi - \xi_{i+1}) \dots (\xi - \xi_{p+1})}{(\xi_i - \xi_1)(\xi_i - \xi_2) \dots (\xi_i - \xi_{i-1})(\xi_i - \xi_{i+1}) \dots (\xi_i - \xi_{p+1})}. \quad (44)$$

Para cada dimensão, conseguimos as funções de interpolação multiplicando os polinômios de Lagrange em cada direção. Como exemplo, para um quadrilátero de 4 nós, temos:

$$N_1 = 1/4(1 + \xi)(1 + \eta) \quad (45)$$

$$N_2 = 1/4(1 - \xi)(1 + \eta) \quad (46)$$

$$N_3 = 1/4(1 - \xi)(1 - \eta) \quad (47)$$

$$N_4 = 1/4(1 + \xi)(1 - \eta) \quad (48)$$

A seguir a imagem da parametrização utilizando o Software Octave:

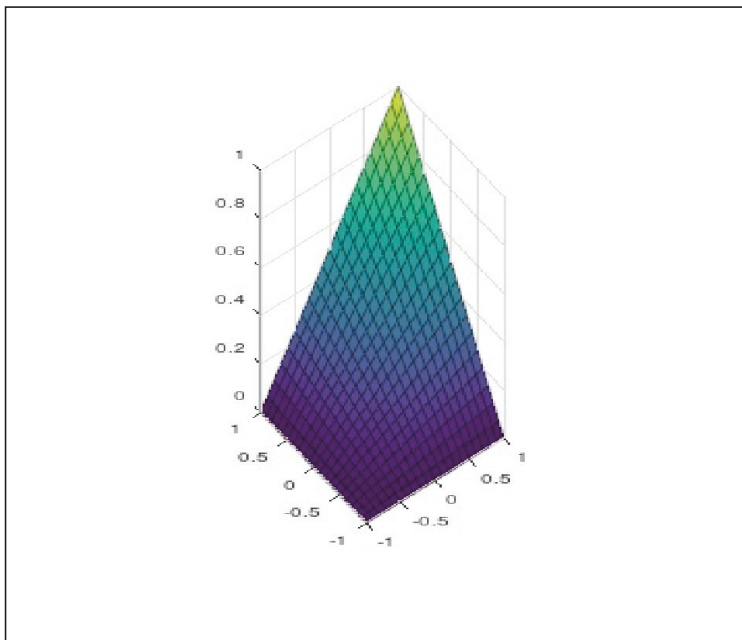


Figura 4 - Elemento N_1

Fonte: Própria

A matriz no método FEA possui N equações e incógnitas, ficando obviamente com um custo elevado computacional, quanto maior for o N .

Também fica maior a função de interpolação, pois como foi definido na forma genérica, o somatório varia de 1 até N .

Outro problema é a forma dos domínios que podem ser bastante trabalhosos para analisar.

Uma solução para esse problema é a parametrização das funções em elementos isoparamétricos, transformando o problema em uma geometria de fácil análise (Ribeiro, 2019).

Em relação ao problema da quantidade de funções, elas apenas não serão zero na matriz K onde o domínio for definido no problema analisado, assim sendo, essa matriz possui uma quantidade grande de zeros nela. Pode-se, com a ajuda da facilidade de se trabalhar com elementos isoparamétricos, isolar cada elemento na mudança de variável, para trabalhar localmente com uma matriz local, e depois juntar os resultados na matriz global.

Para transformar as variáveis x e y em um sistema local N e, basta multiplicarmos o dA por $JdNd\xi$ (sendo J o jacobiano) e mudar os limites de integração.

MÉTODOS DE RESOLUÇÃO DE MATRIZES

Sempre que resolvermos as equações por métodos numéricos, colocaremos elas em formas matriciais para resolução computacional, assim ficando fácil e organizado, além de ser possível a utilização de teoremas que são deduzidos da forma matricial tradicional.

Podemos reduzir uma matriz em uma forma escalonada (onde toda a parte inferior à diagonal principal é igual a zero), para assim ficar de fácil resolução por substituição direta. A seguir, os passos a serem seguidos. (Anton,2012):

Primeiro devemos localizar a coluna mais à esquerda que não seja inteira de zero. A seguir, se a_{ij} for um número a , devemos multiplicar a linha 1 por $1/a$. Depois, permutar a linha não nula mais à direita com a primeira posição. Em seguida somar de forma conveniente a primeira linha com as linhas inferiores. Depois, deixamos fixo a primeira linha e repetimos o procedimento, agora com a segunda linha, até termos a situação desejada:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -2 & 0 & 7 & 12 \\ 2 & 4 & -10 & 6 & 12 & 28 \\ 2 & 4 & -5 & 6 & -5 & -1 \end{bmatrix}$$

↑ Coluna não nula mais à esquerda

$$\begin{bmatrix} 2 & 4 & -10 & 6 & 12 & 28 \\ 0 & 0 & -2 & 0 & 7 & 12 \\ 2 & 4 & -5 & 6 & -5 & -1 \end{bmatrix}$$

← Foram permutadas a primeira e a segunda linhas da matriz precedente.

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & -5 & 3 & 6 & 14 \\ 0 & 0 & -2 & 0 & 7 & 12 \\ 2 & 4 & -5 & 6 & -5 & -1 \end{bmatrix}$$

← A primeira linha da matriz precedente foi multiplicada por $\frac{1}{2}$.

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 & 3 & 0 & 7 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

← 5 vezes a segunda linha foi somada à primeira linha.

Figura 5 - Método do Escalonamento

Fonte: Álgebra Linear com Aplicações

Agora, será abordado o Método Iterativo de Jacobi, método usado em sistema na forma de $Ax=b$.

Este método consiste em isolar o x_i do lado esquerdo da equação, e deixando x_j do lado direito. Em seguida, definisse o x_j como sendo a iteração $k-1$, e o x_i como sendo a iteração k , iterando-se até convergir. Em forma de equação, temos (Burder, 2016):

$$x_i^{(k)} = \frac{1}{a_{ii}} \left[\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (-a_{ij} x_j^{(k-1)}) + b_i \right], \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n.$$

Onde: a_{ij} é o elemento na posição ij da matriz A , e b_i o elemento na posição i da matriz B .

DESENVOLVIMENTO

O método de Euler utiliza-se em situações em que se quer saber o valor de uma EDO, sendo possível isolar a derivada de interesse de um lado da igualdade.

Considerando que se está trabalhando em um lugar que tem admissão por válvulas de algum gás, que leva um tempo para alcançar o regime permanente. Também considerando que a densidade varia apenas com o tempo, e a velocidade em relação ao eixo em que está o seu sentido.

Logo temos a equação a seguir:

$$\frac{dp}{dt} + p \frac{du}{dx} + p \frac{dv}{dy} = 0 \quad (49)$$

Se isolar o termo $\frac{dp}{dt}$ de um lado, e souber o valor de $p(0)$ (valor inicial), bem como a equação que rege $\frac{du}{dx}$ e $\frac{dv}{dy}$, é possível descobrir o seu valor pelo método de Euler.

Este foi um exemplo da utilização do método em mecânica dos fluidos, pois o foco de utilização dos métodos aqui presentes é em equações de mecânica dos fluidos.

Agora considere a equação:

$-k \frac{d^2 u}{dx^2} + w \frac{du}{dx} = f(x)$, sendo k o termo difusivo constante e w o escalar de velocidade.

Utilizando a formulação feita por Corrêa (2024), tem-se:

$$f = -k \frac{u(x+h) - 2u(x) + u(x-h)}{\Delta x^2} + w \frac{u(x+h) - u(x-h)}{2\Delta x} \quad (50)$$

onde, generalizando para 2 dimensões, tem-se:

$$f = -k \left[\frac{u(x+h,t) - 2u(x,t) + u(x-h,t)}{\Delta x^2} + \frac{u(x+h,t) - 2u(x,t) + u(x-h,t)}{\Delta y^2} \right] + w \left[\frac{u(x+h,t) - u(x-h,t)}{2\Delta x} + \frac{u(x+h,t) - u(x-h,t)}{2\Delta y} \right] \quad (51)$$

Ainda de acordo com Corrêa (2024), deve-se alterar o esquema central de segunda ordem do gradiente de u , pelo esquema avançado ou atrasado. Ficando, assim:

$$f = -k \left[\frac{u(x+h,t)-2u(x,t)+u(x-h,t)}{\Delta x^2} + \frac{u(x+h,t)-2u(x,t)+u(x-h,t)}{\Delta y^2} \right] + w \left[\frac{u(x+h,t)-u(x,t)}{2\Delta x} + \frac{u(x+h,t)-u(x,t)}{2\Delta x} \right], \text{ ou}$$

$$f = -k \left[\frac{u(x+h,t)-2u(x,t)+u(x-h,t)}{\Delta x^2} + \frac{u(x+h,t)-2u(x,t)+u(x-h,t)}{\Delta y^2} \right] + w \left[\frac{u(x,t)-u(x-h,t)}{2\Delta x} + \frac{u(x,t)-u(x-h,t)}{2\Delta x} \right] \quad (52)$$

O método dos volumes finitos é mostrado agora:

Ainda de acordo com Corrêa (2024), considere a seguinte equação:

$$-k \frac{d}{dx} \left(\frac{du}{dx} \right) + \rho\omega \frac{du}{dx} = f \quad (53)$$

A qual se transforma em:

$$-k \int_{\Omega} \frac{d}{dx} \left(\frac{du}{dx} \right) d\Omega + \rho\omega \int_S \frac{du}{dx} ds = \int_{\Omega} f d\Omega \quad (54)$$

Se integrar a equação acima em um volume de controle obtemos:

$$\left[-k \frac{du}{dx_e} \right] - \left[-k \frac{du}{dx_w} \right] + (\rho\omega u_e - \rho\omega u_w) = f, \quad (55)$$

A qual se torna, após aproximação:

$$\left[\left(\frac{-k(uE - uP)}{\Delta x_e} \right) - \left(\frac{-k(uP - uW)}{\Delta x_w} \right) \right] + \frac{1}{2} \rho\omega_e (u_E + u_P) - \frac{1}{2} \rho\omega_w (u_P + u_W) = f \quad (56)$$

Generalizando para duas dimensões:

$$-k \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} (\rho\omega u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho\omega u) = f$$

$$-k \iint_{\Omega} \Delta u d\Omega + \rho\omega \oint_S \Delta u ds = \iint_{\Omega} f d\Omega \quad (57)$$

Considerando o domínio de integração como sendo um volume bidimensional, obtemos:

$$-k \iint_{s \ w}^n \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} u + \frac{\partial^2}{\partial y^2} u \right] dx dy + \omega \oint_S u ds = \iint_{s \ w}^n f dx dy \quad (58)$$

Que, após desenvolvimento e aproximações, obtemos:

$$\begin{aligned}
& \left[\left(\frac{k}{\Delta x} + \frac{1}{2} \rho \omega \right) + \left(\frac{k}{\Delta x} - \frac{1}{2} \rho \omega \right) + \left(\frac{k}{\Delta y} + \frac{1}{2} \rho \omega \right) + \left(\frac{k}{\Delta y} - \frac{1}{2} \rho \omega \right) \right] u_{i,j} + \\
& \left(\frac{-k}{\Delta x} + \frac{1}{2} \rho \omega \right) u_{i+1,j} + \left(\frac{-k}{\Delta x} - \frac{1}{2} \rho \omega \right) u_{i-1,j} + \left(\frac{-k}{\Delta y} + \frac{1}{2} \rho \omega \right) u_{i,j+1} + \left(\frac{-k}{\Delta y} - \frac{1}{2} \rho \omega \right) u_{i,j-1} \\
& = f
\end{aligned} \tag{59}$$

Considere agora as seguintes condições de contorno:

$$u(x, 0) = 0, \forall x \in]0, 0.2[$$

$$u(x, 0) = 10(x - 0.2), \forall x \in]0.2, 0.3[$$

$$u(x, 0) = 1, \forall x \in]0.3, 1[$$

$$u(x, 1) = 0, \forall x \in]0, 1[$$

$$u(0, y) = 0, \forall y \in]0, 1[$$

$$u(1, y) = 1, \forall y \in]0, 1[$$

velocidade constante $\omega(1, 1)$

Sendo a representação desse gráfico dada pela figura 4:

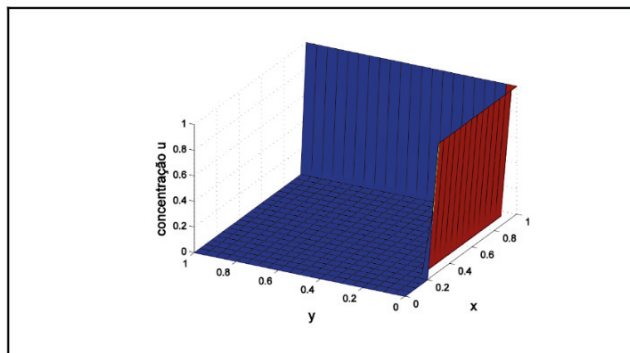


Figura 4 - representação de um contorno

Fonte: Métodos de Diferenças Finitas e Volumes Finitos para Problemas Convectivos Difusivos

Abaixo é mostrada a tabela 1 feita por Corrêa (2024), que traz os resultados usando uma malha de 11 nós utilizando o método das diferenças finitas centrado. A tabela 2 traz o resultado com o método dos volumes finitos.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,1140	0,1693	0,2968	0,2961	0,4820	0,3644	0,7134	0,3182	1,0936	0
0	0,1330	0,1805	0,3560	0,3317	0,6090	0,4192	0,9403	0,3669	1,4651	0
0	0,1399	0,1790	0,3706	0,3306	0,6405	0,4197	1,0002	0,3680	1,5655	0
0	0,1426	0,1782	0,3750	0,3289	0,6485	0,4175	1,0144	0,3661	1,5888	0
0	0,1433	0,1780	0,3761	0,3285	0,6500	0,4169	1,0169	0,3656	1,5928	0
0	0,1426	0,1782	0,3750	0,3289	0,6485	0,4175	1,0144	0,3661	1,5888	0
0	0,1399	0,1790	0,3706	0,3306	0,6405	0,4197	1,0002	0,3680	1,5655	0
0	0,1330	0,1805	0,3560	0,3317	0,6090	0,4192	0,9403	0,3669	1,4651	0
0	0,1140	0,1693	0,2968	0,2961	0,4820	0,3644	0,7134	0,3182	1,0936	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Atividade em 3D/Imagem

Tabela 1 - resultados em MDF centrado

Fonte: Métodos de Diferenças Finitas e Volumes Finitos para Problemas Convectivos Difusivos

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,1140	0,1693	0,2968	0,2961	0,4820	0,3644	0,7134	0,3182	1,0936	0
0	0,1330	0,1805	0,3560	0,3317	0,6090	0,4192	0,9403	0,3669	1,4651	0
0	0,1399	0,1790	0,3706	0,3306	0,6405	0,4197	1,0002	0,3680	1,5655	0
0	0,1426	0,1782	0,3750	0,3289	0,6485	0,4175	1,0144	0,3661	1,5888	0
0	0,1433	0,1780	0,3761	0,3285	0,6500	0,4169	1,0169	0,3656	1,5928	0
0	0,1426	0,1782	0,3750	0,3289	0,6485	0,4175	1,0144	0,3661	1,5888	0
0	0,1399	0,1790	0,3706	0,3306	0,6405	0,4197	1,0002	0,3680	1,5655	0
0	0,1330	0,1805	0,3560	0,3317	0,6090	0,4192	0,9403	0,3669	1,4651	0
0	0,1140	0,1693	0,2968	0,2961	0,4820	0,3644	0,7134	0,3182	1,0936	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 2 - resultados em MVF

Fonte: Métodos de Diferenças Finitas e Volumes Finitos para Problemas Convectivos Difusivos

Observe que os resultados são iguais pois, de acordo com Corrêa (2024), os coeficientes das matrizes resolvidas são iguais.

Agora, considere a seguinte equação:

$$\frac{d\rho}{dt} + \vec{v} \nabla \rho + \rho \frac{du}{dx} + \rho \frac{dv}{dy} = 0 \tag{60}$$

$$\frac{d\rho}{dt} + u \frac{d\rho}{dx} + v \frac{d\rho}{dy} + \rho \frac{du}{dx} + \rho \frac{dv}{dy} = 0 \tag{61}$$

onde ρ é a densidade, u e v a velocidade em x e y respectivamente.

Formulando em diferenças finitas:

$$\frac{\rho(x,y,t+h)-\rho(x,y,t)}{\Delta t} + u \frac{\rho(x+h,y,t)-\rho(x,y,t)}{\Delta x} + v \frac{\rho(x,y+h,t)-\rho(x,y,t)}{\Delta y} + \rho \frac{u(x+h)-u(xt)}{\Delta x} + \rho \frac{v(y+h)-v(y)}{\Delta y} = 0 \tag{62}$$

Considerando que $\Delta x=\Delta y=\Delta t=h$, obtemos:

$$\frac{\rho(x,y,t+h)-\rho(x,y,t)}{h} + u \frac{\rho(x+h,y,t)-\rho(x,y,t)}{h} + v \frac{\rho(x,y+h,t)-\rho(x,y,t)}{h} + \rho \frac{u(x+h)-u(xt)}{h} + \rho \frac{v(y+h)-v(y)}{h} = 0 \quad (63)$$

Considerando a função ρ conhecida em seu contorno, também conhecida a variação de u e v , temos uma equação que será analisada em n nós de uma região, resultando assim em uma matriz de n incógnitas e n equações. Está é a situação mais fácil de resolução, sem precisar de métodos numéricos para resolução das equações. Se soubermos o valor de v e de u , e de suas variações, e da densidade no contorno do objeto de análise, conseguimos resolver por métodos simples como escalonamento.

Agora, vamos formular para volumes finitos, assim:

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla v \cdot \rho = 0 \quad (64)$$

$$\int \left(\frac{d\rho}{dt} + \nabla v \cdot \rho \right) dx dy dt = 0 \quad (65)$$

$$\int \frac{d\rho}{dt} dx dy dt = \int (\rho_{t+\Delta t} - \rho_t) dx dy = \int (\rho_{t+\Delta t} - \rho_t) \Delta x \Delta y \quad (66)$$

$$\begin{aligned} \int \nabla(v \cdot \rho) dx dy dt &= \int \left(\frac{\partial(v \cdot \rho)}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot \rho)}{\partial y} \right) dt dx dy = \int (u \rho_{x+\Delta x} - u \rho_x) dt dy + \\ &+ \int (v \rho_{y+\Delta y} - v \rho_y) dt dx \end{aligned} \quad (67)$$

Assim, obtemos:

$$(\rho_{t+\Delta t} - \rho_t) \Delta x \Delta y + (u \rho_{x+\Delta x} - u \rho_x) \Delta t \Delta x + (v \rho_{y+\Delta y} - v \rho_y) \Delta t \Delta x = 0 \quad (68)$$

Ainda, se considerarmos que: $\Delta t = \Delta x = \Delta y$, obtemos:

$$(\rho_{t+\Delta t} - \rho_t) + (u \rho_{x+\Delta x} - u \rho_x) + (v \rho_{y+\Delta y} - v \rho_y) = 0 \quad (69)$$

Sendo de fácil resolução.

Acima, consideramos que a variação temporal e nos eixos x e y são iguais, para assim podermos “cortar” na equação. Podemos também supor que ambos possuem variação unitária, e definir a variação temporal como segundo, e a variação espacial como milímetro.

A seguir, o método dos elementos finitos aplicado em duas equações diferentes.

Primeiro, tem-se:

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(v \vec{\rho}) \right) w d\Omega = 0 \quad (70)$$

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \rho}{\partial t} w d\Omega + \int_{\Omega} \frac{\partial(u\rho)}{\partial x} w d\Omega + \int_{\Omega} \frac{\partial(v\rho)}{\partial y} w d\Omega = 0 \quad (71)$$

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \rho}{\partial t} w d\Omega = w\rho - \int_{\Omega} \rho \frac{\partial w}{\partial t} \Omega \quad (72)$$

$$w\rho = \int \nabla w \rho d\Omega = \int \rho n w dr \quad (73)$$

$$\int_{\Omega} \nabla(v \vec{\rho}) w d\Omega = v \vec{\rho} w - \int_{\Omega} v \vec{\rho} \nabla w d\Omega \quad (74)$$

$$\int_{\Omega} \nabla(v \vec{\rho} w) d\Omega = \int_r v \vec{\rho} w n dr \quad (75)$$

Juntando:

$$\int \rho w n dr + \int v \vec{\rho} w n dr - \int \rho \frac{dw}{dt} d\Omega - \int v \vec{\rho} \nabla w d\Omega = 0 \quad (76)$$

Aproximando as funções por polinômios de interpolação, tem-se:

$$\hat{u} = \sum_j N_j u_j \quad (77)$$

$$\hat{w} = \sum_i N_i u_i \quad (78)$$

$$N_1 = 1/8(1+x)(1+y)(1+t) \quad (79)$$

$$\int \sum_j N_j u_j \frac{dN_i}{dt} d\Omega + \int v \vec{\rho} \sum_j N_j u_j \nabla \sum_i N_i u_i d\Omega = \int \rho w dr + \int v \vec{\rho} w dr \quad (80)$$

Como u_i pode ser qualquer valor arbitrário que desejarmos, obtemos:

$$u_j \left(\int N_j \frac{dN_i}{dt} d\Omega + \int v \vec{\rho} N_j \nabla N_i d\Omega \right) = \int \rho w dr + \int v \vec{\rho} w dr \quad (80)$$

ou:

$$F = KX$$

sendo que :

$$F = \int \rho w dr + \int v \vec{\rho} w dr \quad (81)$$

$$K = \int N_j \frac{dN_i}{dt} d\Omega + \int v \vec{\rho} N_j \nabla N_i d\Omega \quad (82)$$

Nessa formulação acima, a condição de contorno é aplicada na integração do contorno r , assim precisamos saber o valor de ρ em r e o valor de v em r , para assim

conseguirmos resolver este problema. Saber o valor de ∇ significa saber qual a densidade na região r , e saber $\vec{v}$ significa ter o valor da velocidade vetorial em r .

Agora, aplicando o modelo SUPG:

O modelo para equação do transporte de um traçador pelo fluido de um reservatório é (Ribeiro, 2024):

$$\phi \frac{\partial c}{\partial t} + u \cdot \nabla c + \nabla \cdot (-D \nabla c) = 0, \text{ sendo:} \quad (83)$$

c a concentração do traçador, ϕ a porosidade do meio e D o tensor de difusão dado por:

$$D = \left(\frac{\alpha_{mol}}{\tau} + \alpha_T |u| \right) I + \frac{\alpha_L - \alpha_T}{|u|} u \cdot u^t \quad (84)$$

sendo que u é:

$$u = \nabla \cdot \left(-\frac{k}{\mu} \nabla p \right) \quad (85)$$

A seguir, é mostrado um gráfico de solução com as seguintes considerações (Ribeiro, 2024) : 1000m * 1000m de dimensão total, fluxo de entrada de -50 m²/dia, $k = 100\text{mD}$, $\mu=1$, $\phi=0.1$, $c_o=0$, $c=1$ de 1 até 100 dias, $\alpha = 1$ e $\Delta t = 1$ dia.

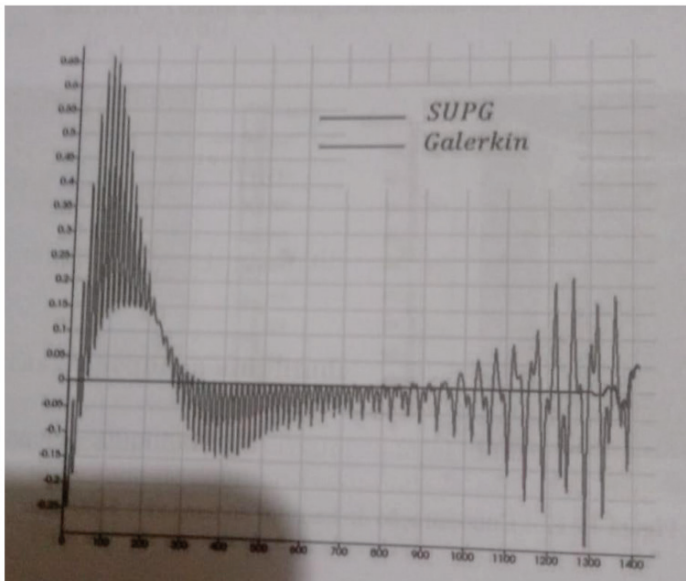


Figura 5 - Concentração do traçador em 2000 dias ao longo da diagonal entre os poços de injeção e produção

Fonte: Introdução ao Método dos Elementos Finitos

CONCLUSÕES

Nesta pesquisa de revisão bibliográfica, foram demonstradas diversas formas de solução a equações diferenciais e problemas dentro da engenharia mecânica, na área de mecânica dos fluidos. Tais equações tem importância na engenharia e suas soluções trazem informações úteis sobre o problema que está sendo analisado. Foi demonstrado a solução de problemas utilizando os quatro métodos propostos. É preciso também levar em consideração a quantidade enorme de soluções diferentes possíveis para uma equação utilizando métodos diferentes, ou até o mesmo método.

Considere por exemplo o método dos elementos finitos. Neste trabalho foi pesquisado e aplicado apenas o método de galerkin e a formulação semi-discreta SUPG, mas existem outros métodos e formulações, como o método de Rayleigh-Ritz.

Também foram apresentados alguns tipos de elementos possíveis de se aplicar, mas também existem elementos com formatos diferentes que não foram abordados nesta pesquisa.

Destaca-se o método de Euler em EDOs, com apenas uma derivada, onde iguale-se a derivada com o restante da equação. Para situações mais complexas, com mais derivadas na equação, ou se a equação for EDP, utiliza-se os outros métodos.

O método mais simples e fácil é o método das diferenças finitas, onde o domínio de análise é dividido em geometrias exatas, além de ter a vantagem de poder ser aplicado nas mesmas equações que os métodos dos volumes e elementos finitos podem ser aplicados. Porém, quanto mais complexo a geometria, mais demorado fica a convergência desse método, além de mais complexo, sendo portanto ideal para geometrias simples, onde acaba sendo mais fácil de formular o método se comparado com os outros dois. Porém, se a geometria for complexa, a sua dificuldade e demora de convergência faz com que seja justificado a aplicação dos outros métodos.

Em geometrias complexas, o método dos elementos finitos se sobressai em relação ao das diferenças finitas, pois consegue uma divisão de domínio de integração mais flexível, conseguindo assim uma formulação da maneira mais ideal possível, visando tanto uma convergência ótima, quanto uma quantidade menor de elementos.

Já o método dos Volumes Finitos é ideal em equações envolvendo fluidos, pois como já comentado, ele garante a conservação das propriedades, como por exemplo, a conservação da massa, algo que não ocorre com os outros métodos.

Todos os métodos são realmente muito úteis na engenharia, e o que foi apresentado aqui foi uma parte de uma área matemática vasta de materiais existentes, além de possíveis novas formulações futuras por cientistas ao redor do mundo, para cada vez mais chegarmos a valores mais próximos da realidade.

REFERÊNCIAS

ANTON, Howard; RORRES, Chris. *Álgebra linear com aplicações*. Porto Alegre: Grupo A, 2012. E-book. ISBN 9788540701700. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788540701700/>. Acesso em: 11 jul. 2024.

BRASIL, Reyolando M. L. R. F.; BALTHAZAR, José M.; GÓIS, Wesley. **Métodos numéricos e computacionais na prática de engenharias e ciências**. [S.l.]: Editora Blucher, 2015. E-book. ISBN 9788521209362. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521209362/>. Acesso em: 25 abr. 2023.

BURDEN, Richard L.; FAIRES, J. D.; BURDEN, Annette M. **Análise numérica**. Tradução da 10ª edição norte-americana. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2016. E-book. ISBN 9788522123414. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522123414/>. Acesso em: 11 jul. 2024.

CHAPRA, Steven C.; CANALE, Raymond P. **Métodos numéricos para engenharia**. [Porto Alegre - RS]: Grupo A, 2016. E-book. ISBN 9788580555691. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580555691/>. Acesso em: 20 fev. 2023.

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. **Mecânica dos fluidos**. [Porto Alegre - RS]: Grupo A, 2015. E-book. ISBN 9788580554915. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580554915/>. Acesso em: 15 fev. 2023.

ÇENGEL, Yunus A.; III, William J. P. **Equações diferenciais**. [Porto Alegre - RS]: Grupo A, 2014. E-book. ISBN 9788580553499. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580553499/>. Acesso em: 15 fev. 2023.

FILHO, Avelino A. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE**. [São José dos Campos, SP]: Editora Saraiva, 2009. E-book. ISBN 9788536519708. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536519708/>. Acesso em: 15 fev. 2023.

MALISKA, Clovis R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2ª ed. [Barueri | SP]: Grupo GEN, 2004. E-book. ISBN 9788521633365. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521633365/>. Acesso em: 25 abr. 2023.

NEIDE, Bertoldi F. **Cálculo numérico**. 1. ed. [S.l.]: Pearson, 2015.

REDONDA, V. *et al.* **Métodos de diferenças finitas e volumes finitos para problemas convectivos difusivos**. Disponível em: http://www.mcct.sites.uff.br/wp-content/uploads/sites/454/2018/09/Dissertacao_7.pdf. Acesso em: 26 jan. 2024.

RIBEIRO, Fernando Luiz B. **Introdução ao método dos elementos finitos**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2020.

MAPLE NO ENSINO DE MATEMÁTICA: MÉTODOS PARA CRIAÇÃO DE EXERCÍCIOS E RECURSOS VISUAIS

Data de submissão: 06/11/2024

Data de aceite: 02/12/2024

Thiago Daboit Roberto

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- UERJ
Rio de Janeiro, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2694615438248688>

Maximiano Correia Martins

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- UERJ
Rio de Janeiro - RJ
<http://lattes.cnpq.br/3232700055302552>

André Pereira de Almeida

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- UERJ
Rio de Janeiro - RJ
<http://lattes.cnpq.br/6871464920281079>

Thiago Corrêa Almeida

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- UERJ
Rio de Janeiro - RJ
<http://lattes.cnpq.br/3266404381934797>

RESUMO: Este estudo examina o uso do Maple como ferramenta tecnológica para o ensino de matemática, com foco na criação de listas de exercícios com gabaritos automáticos. O modelo proposto utiliza variáveis nomeadas para organizar

os enunciados das questões e simplificar a criação dos gabaritos, permitindo que o Maple gere soluções automáticas e precisas. Esse método é ilustrado por meio de listas de exercícios em álgebra linear e cálculo, nas quais o Maple realiza operações matriciais e calcula derivadas de forma rápida e confiável. Essa abordagem facilita a correção, reduz erros e permite que o professor personalize os exercícios conforme o nível da turma, promovendo uma experiência de aprendizado visual e interativa que favorece o entendimento de conceitos complexos e oferece uma ferramenta pedagógica eficiente e adaptável às necessidades dos alunos.

PALAVRAS-CHAVE: Maple, Educação Matemática, Exercícios Automatizados, Aprendizagem Interativa.

MAPLE IN MATHEMATICS EDUCATION: METHODS FOR CREATING EXERCISES AND VISUAL RESOURCES

ABSTRACT: This study examines the use of Maple as a technological tool for mathematics education, focusing on the creation of exercise lists with automatic answer keys. The proposed model utilizes

named variables to organize problem statements and streamline the development of answer keys, allowing Maple to generate accurate, automated solutions. This method is illustrated through exercise lists in linear algebra and calculus, where Maple performs matrix operations and computes derivatives quickly and reliably. This approach facilitates grading, reduces errors, and enables instructors to customize exercises according to the class level, promoting a visual and interactive learning experience that enhances the understanding of complex concepts and provides an efficient, adaptable pedagogical tool to meet students' needs.

KEYWORDS: Maple, Mathematics Education, Automated Exercises, Interactive Learning.

1 | INTRODUÇÃO

O uso de ferramentas tecnológicas no ensino de matemática tem se tornado cada vez mais comum, trazendo inúmeros benefícios para a educação. Em especial, o Maple destaca-se como uma plataforma que facilita a criação de conteúdos interativos, oferecendo aos professores uma maneira inovadora de ensinar temas complexos e proporcionando aos alunos uma experiência de aprendizado mais visual e prática. Suas funcionalidades de manipulação simbólica e geração gráfica contribuem significativamente para disciplinas como cálculo, álgebra e outras áreas que exigem visualizações dinâmicas e precisas (Henriques & Almouloud, 2016; Carvalho Borba et al., 2020).

Um dos principais objetivos do uso do Maple no contexto educacional é viabilizar uma abordagem interativa que integre conceitos por meio de simulações e animações, ilustrando o comportamento de funções matemáticas. Pesquisas mostram que, para muitos estudantes, especialmente aqueles que enfrentam dificuldades com abstrações algébricas, a visualização dos problemas torna o entendimento mais acessível e intuitivo, promovendo uma aprendizagem significativa, como apontado no ensino de derivadas (Isaia & Sangoi, 2011). No Brasil, o uso desta ferramenta em conjunto com lousas digitais tem mostrado potencial para apoiar a compreensão de conceitos complexos em cursos de engenharia, permitindo que estudantes explorem visualmente os problemas e reforcem seu entendimento sobre cálculo diferencial e integral (Kaiber & Vechia, 2012).

Além disso, os professores podem adaptar os exercícios ao nível da turma, ajustando a dificuldade e o enfoque conforme as necessidades dos alunos (Dodson & Gonzalez, 2012). É possível também gerar listas de exercícios com gabaritos automáticos, o que facilita a correção e reduz o risco de erros (Corless, 2013). O uso de gráficos dinâmicos e animações, inclusive em arquivos *.html*, possibilita uma exploração visual de conceitos matemáticos que seriam difíceis de compreender apenas com representações analíticas. O uso de representações tridimensionais, como descrito por Henriques e Almouloud (2016), auxilia estudantes a visualizar fenômenos matemáticos, promovendo uma compreensão mais profunda desses conceitos.

Contudo, o uso dessa tecnologia apresenta desafios que merecem consideração. Alguns professores podem encontrar dificuldades em dominar a ferramenta, especialmente

em contextos em que a infraestrutura e o suporte técnico são limitados, conforme discutido por Carvalho Borba et al. (2020) no contexto brasileiro. Diante disso, este capítulo apresenta um modelo de geração de listas com gabaritos automáticos, visando facilitar o uso do Maple e expandir seu potencial pedagógico para os docentes.

2 | MODELO PARA CRIAÇÃO DE LISTAS DE EXERCÍCIOS COM O MAPLE

A criação de listas de exercícios com essa ferramenta oferece várias opções para configurar e personalizar atividades matemáticas. Este método baseia-se na prática de nomear explicitamente todas as funções usadas no enunciado dos problemas, tornando o desenvolvimento do gabarito independente e simplificado. Isso significa que cada função recebe um nome específico, e o código Maple necessário para resolver a questão e gerar gráficos é escrito apenas no gabarito. Dessa forma, o enunciado permanece estático, e o código atua de forma independente. A nomeação explícita das variáveis no exercício traz facilidade e clareza ao processo de criação do gabarito, simplificando e tornando-o menos complexo. Essa estrutura é especialmente adequada para criar listas de exercícios padronizadas, que podem ser rapidamente adaptadas e reutilizadas em diferentes turmas. A Figura 1 representa um exemplo de função do método 1.

Questão 1 - Considere a função abaixo. Determine a sua derivada $\left(\frac{df}{dx}\right)$ e sua integral $\left(\int_0^x f dx\right)$, em seguida, faça, no mesmo plano cartesiano, o gráfico da função, de sua derivada e de sua integral.

a) $f := x^2 + x + 1$:

Gabarito:

Questão 1

A derivada de $x^2 + x + 1$ é $2x + 1$ e sua integral é $\frac{1}{3}x^3 + \frac{1}{2}x^2 + x$

Figura 1 – Exemplo de questão criada pelo método 1.

Na Figura 1, o enunciado textual da questão é fixo e não sofre alterações. A letra a) da questão apresenta uma função f . No Maple, f é definida como uma variável simbólica que receberá a função x^2+x+1 . É importante destacar que f não representa a função $f(x)$, mas apenas um símbolo arbitrário, que poderia ser substituído por qualquer outro. Neste modelo, usa-se f por se assemelhar ao $f(x)$, mas isso não é uma exigência. O gabarito é gerado automaticamente ao alterar a função atribuída a f , permitindo que o professor copie e cole a questão e seu gabarito de forma rápida. Também é possível configurar um gerador de funções aleatórias para criar quantas questões quiser, de maneira diversificada. Além disso, não é necessário se restringir a uma única função atribuída.

Para ilustrar ainda mais essa aplicação, os gráficos da função $f(x)=x^2+x+1$, de sua derivada $f'(x)$ e de sua integral $\int f(x)dx$ foram gerados no Maple. Esses gráficos, apresentados nas Figuras 2 a 5, oferecem uma visualização completa das operações.

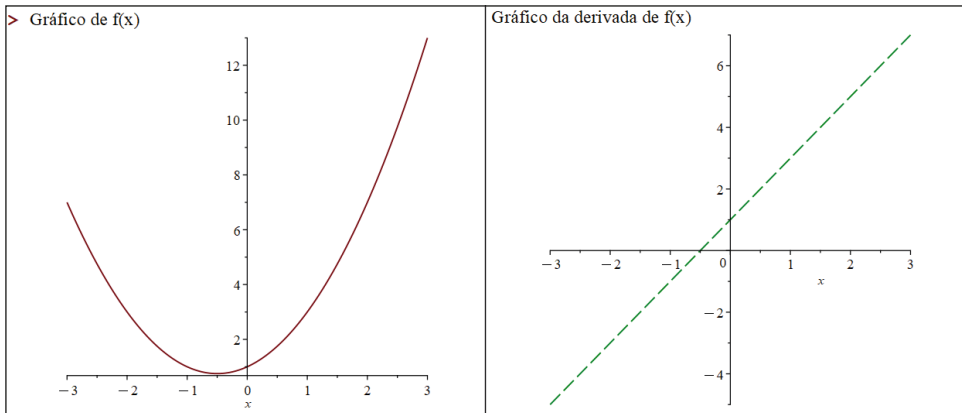


Figura 2 – Gráfico da função e sua derivada.

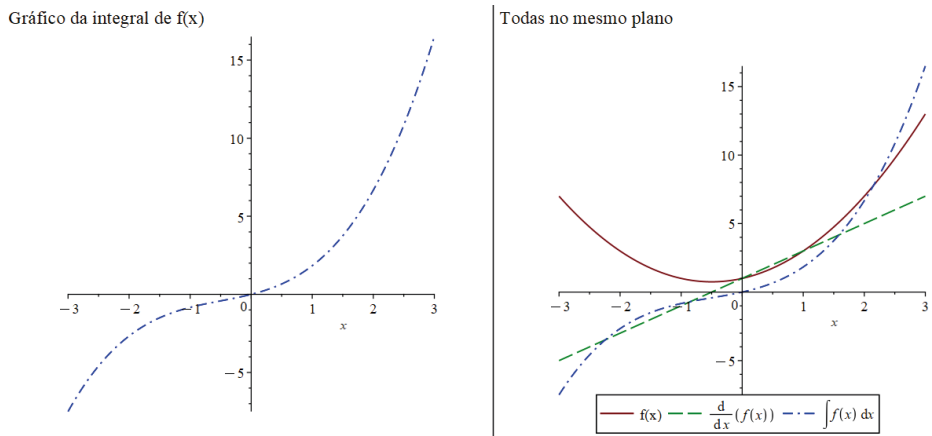


Figura 3 – Gráficos da integral da função e gráficos combinados no mesmo plano cartesiano.

Esses gráficos ajudam a visualizar as relações entre a função, sua derivada e sua integral, destacando como o Maple pode ser utilizado para criar representações visuais de cálculos matemáticos complexos. Essa abordagem facilita o entendimento dos conceitos de cálculo diferencial e integral, promovendo um aprendizado mais intuitivo e interativo.

Para criar esse tipo de modelo, é necessário primeiro configurar um documento no Maple. Em seguida, insere-se a questão no modo texto e a função no modo matemática, alternando entre os dois modos conforme necessário para organizar o conteúdo da melhor forma. A Figura 4 ilustra esse procedimento, mostrando como formatar o enunciado e a função.

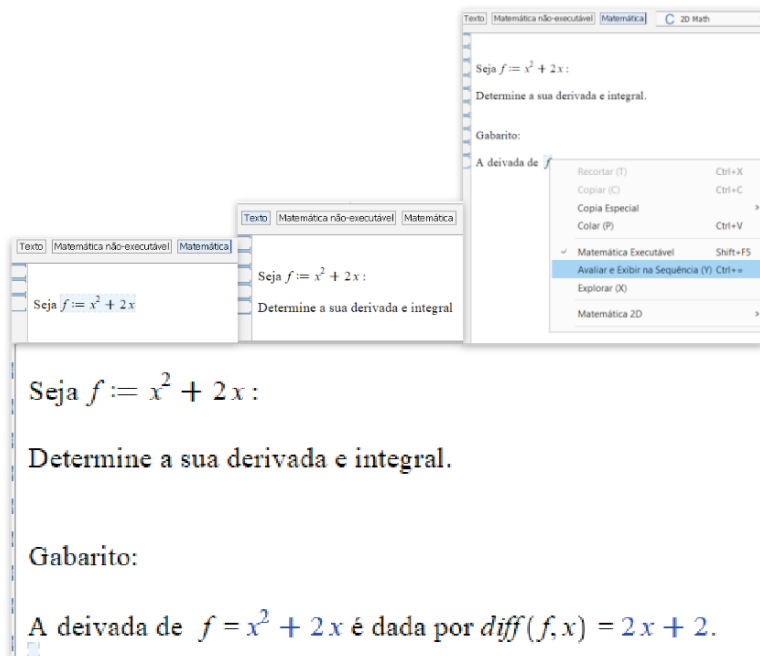


Figura 4. Desenvolvimento da questão simples.

Para criar uma questão bem formatada no Maple, siga os passos a seguir. Primeiro, inicie no modo texto e escreva a introdução da questão. Em seguida, alterne para o modo matemática para inserir a função que será analisada. Depois de definir a função, retorne ao modo texto para finalizar a descrição da questão. Concluído esse processo, clique com o botão direito sobre as expressões matemáticas e selecione “Avaliar e exibir na sequência”. Esse comando fará com que o Maple exiba o resultado diretamente ao lado das expressões inseridas, proporcionando uma formatação clara e organizada. Esse método permite que o professor altere a função inicial conforme desejado, atualizando automaticamente os resultados derivados. O procedimento pode ser facilmente expandido para uma lista de questões, tornando-o ideal para a criação de materiais didáticos.

A Figura 5 mostra um exemplo de lista de álgebra linear criada por esse método. Nesse caso, em vez de f , são utilizadas as letras $A, B, C, D, \dots, L$, que tradicionalmente representam matrizes. A Figura 6 mostra um exemplo de lista de cálculo 1 criada por esse método. Pode-se alterar as funções de maneira rápida e se criar listas sobre derivadas de funções.

Considere as matrizes listadas abaixo:

$$A := \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 3 & 4 \end{bmatrix}; B := \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ -1 & 3 \end{bmatrix}; C := \begin{bmatrix} 5 \\ 4 \end{bmatrix}; De := \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}; F := \begin{bmatrix} 2 & -1 \end{bmatrix}; G := \begin{bmatrix} 5 & 3 \end{bmatrix}; H := \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \\ 4 & 2 & 1 \end{bmatrix}; i := \begin{bmatrix} 2 & 3 & 4 \\ 2 & 5 & 1 \\ 3 & 5 & 7 \end{bmatrix};$$

$$J := \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \\ 5 & 0 & 9 \end{bmatrix}; K := \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 2 & 1 \\ 5 & 3 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}; L := \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix};$$

Questão 1 -Efetue as operações pedidas.

a) $2 \cdot A$ b) $-1 \cdot B$ c) d) $A - B$ e) $C + De$

f) $F - 2 \cdot G$ g) $2 \cdot H$ h) $H + i$ i) $J + H + i$ j) AB

k) AC l) BDe m) $(AC) + De$ n) $(BDe)F$

o) $(BC)FA$ p) Hi q) LK

Gabarito

Questão 1:

a) $\begin{bmatrix} 4 & 2 \\ 6 & 8 \end{bmatrix}$ b) $\begin{bmatrix} 2 & -1 \\ 1 & -3 \end{bmatrix}$ c) $\begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 2 & 7 \end{bmatrix}$ d) $\begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 4 & 1 \end{bmatrix}$ e) $\begin{bmatrix} 5 \\ 5 \end{bmatrix}$ f) $\begin{bmatrix} -8 & -7 \end{bmatrix}$ g) $\begin{bmatrix} 4 & 2 & 2 \\ 0 & 2 & 4 \\ 8 & 4 & 2 \end{bmatrix}$

Figura 5.Exemplo de lista de álgebra linear.

A Figura 5 apresenta um exemplo de lista de exercícios de álgebra linear desenvolvida no Maple, focada em operações com matrizes. Essa lista inclui diversas matrizes definidas e identificadas pelas letras A até L, com variações em suas dimensões e valores. Os exercícios propostos exigem que o aluno execute várias operações matriciais, como adição, subtração, multiplicação de matrizes e combinações mistas, envolvendo múltiplas operações.

Na primeira parte da figura, observa-se a definição de várias matrizes, cada uma representada por uma letra. Essas matrizes apresentam dimensões variadas, o que permite explorar tanto operações compatíveis quanto incompatíveis. Esse exercício incentiva o aluno a verificar a possibilidade de realizar cada operação antes de resolvê-la, consolidando seu entendimento sobre as regras de compatibilidade dimensional nas operações matriciais e sobre as propriedades da álgebra linear.

A lista de questões inclui operações básicas, como adição e subtração (por exemplo, $A-B$ e $C+De$), multiplicação escalar (como $2 \cdot H$), multiplicação de matrizes (como AB e $(BDe)F$), e combinações mais complexas. Essas operações ajudam os alunos a reforçarem conceitos fundamentais de álgebra linear, enquanto praticam a execução e interpretação das operações matriciais.

Abaixo da lista de questões, o gabarito gerado automaticamente apresenta as respostas de maneira organizada e precisa. Cada resposta corresponde à operação realizada, fornecendo matrizes resultantes. Esse gabarito automático elimina erros de

cálculo manual, economiza tempo para o professor e oferece aos alunos uma maneira eficiente de verificar suas respostas e entender o processo de resolução.

Questão 1 - Efetue a derivada das funções abaixo em relação a x.

a) $f1 := x$	b) $f2 := x^5$	c) $f3 := x^{\frac{2}{3}}$	d) $f4 := 4x^{\frac{5}{7}}$
e) $f5 := x^{-1}$	f) $f6 := 5x^{-3}$	g) $f7 := 3x^{-\frac{3}{2}}$	h) $f8 := 2^x$
i) $f9 := -3^x$	j) $f10 := 5^{-x}$	l) $f11 := 3^{2x+3}$	m) $f12 := 3^{-2x}$
n) $f13 := \sin(x)$	o) $f14 := 3 \sin(x)$	p) $f15 := \cos(x)$	q) $f16 := 2 \cos(x)$
r) $f17 := \ln(x)$	s) $f18 := 3 \ln(x)$	t) $f19 := e^x$	u) $f20 := e^{3x}$

Gabarito

Obs: Números com um espaço entre eles implica em números multiplicados. por exemplo: 2 3 é a mesma coisa que 2 vezes 3.

Questão 1

a) 1	b) $5x^4$	c) $\frac{2}{3x^{\frac{1}{3}}}$	d) $\frac{20}{7x^{\frac{2}{7}}}$	e) $-\frac{1}{x^2}$	f) $-\frac{15}{x^4}$	g) $-\frac{9}{2x^{\frac{5}{2}}}$
h) $2^x \ln(2)$	i) $-3^x \ln(3)$	j) $-5^{-x} \ln(5)$	l) $2 \cdot 3^{2x+3} \ln(3)$	m) $-2 \cdot 3^{-2x} \ln(3)$		
n) $\cos(x)$	o) $3 \cos(x)$	p) $-\sin(x)$	q) $-2 \sin(x)$	r) $\frac{1}{x}$	s) $\frac{3}{x}$	
t) e^x	u) $3e^{3x}$					

Figura 6.Exemplo de lista de cálculo.

A Figura 6 apresenta um exemplo de lista de exercícios de cálculo gerada pelo Maple, focada no cálculo de derivadas de funções variadas. Nesse exemplo, cada função é definida de forma simbólica e atribuída a uma variável (como f1,f2,...,f20), e o Maple calcula automaticamente a derivada de cada uma em relação à variável x.

Esse modelo de criação de listas de exercícios permite ao professor configurar rapidamente uma série de questões, explorando diferentes tipos de funções — polinomiais, exponenciais, logarítmicas e trigonométricas — para cobrir um espectro amplo de conteúdo. O gabarito é gerado automaticamente pelo software, o que elimina erros de cálculo e facilita a correção das atividades.

Esse tipo de lista é particularmente útil para revisar conceitos fundamentais e para adaptar o nível de dificuldade dos exercícios. Ademais, é possível substituir as funções iniciais de forma rápida, de modo que o professor pode criar variações da lista para diferentes turmas, ajustando a complexidade conforme necessário.

3 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso do Maple para a criação de listas de exercícios com gabaritos automáticos simplifica e organiza o processo de elaboração de atividades matemáticas. A abordagem apresentada permite que professores alterem rapidamente funções e questões, gerando

materiais personalizados para cada turma e reduzindo o risco de erros. Além disso, a possibilidade de atualização automática dos gabaritos facilita a correção e a reutilização das listas de exercícios.

Esse modelo contribui para uma experiência de ensino mais prática e eficiente, promovendo um aprendizado visual e interativo, adequado às necessidades dos alunos e ao conteúdo de disciplinas complexas como cálculo e álgebra.

REFERÊNCIAS

HENRIQUES, A.; ALMOULOU, S. A. **Análise de superfícies e funções de duas variáveis com intervenção do software Maple**. *Ciência & Educação*, v. 22, n. 2, p. 465-478, 2016. <https://doi.org/10.1590/1516-731320160020012>, Disponível em: http://educa.fcc.org.br/pdf/_ciedu/v22n2/1516-7313-ciedu-22-02-0465.pdf. Acesso em: 05 nov. 2024.

CARVALHO BORBA, M.; SILVA, R. S. R.; GADANIDIS, G. **Fases das tecnologias digitais em Educação Matemática: sala de aula e internet em movimento**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2020. Disponível em: https://books.google.com/books?id=ks_pDwAAQBAJ. Acesso em: 05 nov. 2024.

KAIBER, C. T.; VECHIA, R. **A Lousa Digital e o uso do Maple no cálculo diferencial e integral: potencialidades mediáticas**. In: **XXVI Reunión Latinoamericana de Matemática Educativa**, 2012, Brasil. Anais [...]. São Paulo: Centro Latinoamericano de Matemática, 2012. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/33251290.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2024.

SILVEIRA, E. **Modelagem matemática em educação no Brasil: entendendo o universo de teses e dissertações**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/26978871_Modelagem_matematica_em_educacao_no_Brasil_entendendo_o_universo_de_teses_e_dissertacoes. Acesso em: 05 nov. 2024.

ISAIA, S. M. A.; SANGOI, E. **Aprendizagem significativa da derivada com o uso do software Maple através da metodologia da resolução de problemas**. *VIDYA*, v. 31, n. 1, p. 75-88, 2011. Disponível em: <https://periodicos.ufn.edu.br/index.php/VIDYA/article/download/288/263>. Acesso em: 05 nov. 2024.

DODSON, C. T. J.; GONZALEZ, E. A. **Experiments in Mathematics Using Maple**. New York: Springer, 2012. Disponível em: <https://books.google.com/books?id=fenwCAAQBAJ>. Acesso em: 05 nov. 2024.

CORLESS, R. M. **Essential Maple: An Introduction for Scientific Programmers**. New York: Springer, 2013. Disponível em: <https://books.google.com/books?id=pOjCBwAAQBAJ>. Acesso em: 05 nov. 2024.

REALIDADE AUMENTADA NO ENSINO DE FÍSICA

Data de submissão: 05/11/2024

Data de aceite: 02/12/2024

Thiago Daboit Roberto

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- UERJ
Rio de Janeiro, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2694615438248688>

André Pereira de Almeida

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- UERJ
Rio de Janeiro - RJ
<http://lattes.cnpq.br/6871464920281079>

Thiago Corrêa Almeida

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- UERJ
Rio de Janeiro - RJ
<http://lattes.cnpq.br/3266404381934797>

Maximiano Correia Martins

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- UERJ
Rio de Janeiro - RJ
<http://lattes.cnpq.br/3232700055302552>

Flávia Luzia Jasmim

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- UERJ
Rio de Janeiro - RJ
<http://lattes.cnpq.br/2200753999568458>

Levi Phelipe da Silva Franklin

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- UERJ
Rio de Janeiro - RJ
<http://lattes.cnpq.br/7492640640048930>

Miguel Lucas Vasconcellos

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- UERJ
Rio de Janeiro - RJ
<http://lattes.cnpq.br/2312022565801317>

RESUMO: A integração de smartphones em sala de aula possui o potencial de enriquecer o aprendizado dos alunos com conteúdo de alta qualidade; entretanto, seu uso isolado não assegura o aproveitamento pleno desses recursos. Este estudo investiga a aplicação da Realidade Aumentada (RA) como ferramenta para tornar o ensino de física mais interativo e eficaz. Utilizando as plataformas Unity e Vuforia, foi desenvolvido um aplicativo para dispositivos Android que permite a visualização de objetos virtuais sobrepostos ao ambiente físico, facilitando o estudo de óptica geométrica. Como material didático complementar, foi elaborada uma apostila com marcadores visuais, de modo que os

alunos possam interagir com modelos tridimensionais durante as aulas, aprofundando seu entendimento dos conceitos físicos.

PALAVRAS-CHAVE: Tecnologias Educacionais; Realidade Aumentada; Ensino de Física; Aplicativos Android.

AUGMENTED REALITY IN PHYSICS EDUCATION

ABSTRACT: The integration of smartphones in the classroom has the potential to enrich student learning with high-quality content; however, their use alone does not ensure full engagement with these resources. This study investigates the application of Augmented Reality (AR) as a tool to make physics education more interactive and effective. Utilizing Unity and Vuforia platforms, an Android application was developed to enable the visualization of virtual objects superimposed onto the physical environment, facilitating the study of geometric optics. As a complementary instructional resource, a guide containing visual markers was created, allowing students to interact with three-dimensional models during lessons and deepen their understanding of physical concepts.

KEYWORDS: Educational Technologies; Augmented Reality; Physics Education; Android Applications.

1 | INTRODUÇÃO

Informações sobre descobertas científicas, estudos de ponta, entre outros, relacionados à temática de uma aula, podem contribuir para o melhor desempenho do aluno. Porém, o acesso a esses conteúdos por estudantes da Educação Básica não garante que estejam aproveitando toda a capacidade tecnológica desses dispositivos. Esse contexto desafia o educador a repensar e modernizar o ensino para seus alunos. Segundo Zulian e Freitas (2001), é cada vez mais premente a elaboração e o uso de recursos didáticos que contemplem as reais necessidades de todos os estudantes, por meio de ambientes de aprendizagem interativos, mediados por softwares educativos.

Em particular, o ensino de Física enfrenta grandes desafios para o aprendizado dos alunos e procura encontrar maneiras de reduzir as dificuldades e apresentar resultados relevantes e significativos. Segundo Barroso et al. (2018), o aprendizado de Física ainda enfrenta diversos obstáculos devido à maneira como os estudantes processam informações. No entanto, experiências virtuais e simulações proporcionam aos docentes e alunos novas oportunidades de ensino e aprendizado, focadas na investigação e experimentação. A união do celular com a tecnologia de Realidade Aumentada (RA) possibilita a transformação de conteúdo abstrato em interativos. Rezende et al. (2021) sugerem que a RA usa o ambiente real como base para uma experiência que guia o usuário a se conectar com o mundo virtual, mantendo a percepção de que estão no mundo real ao mesmo tempo em que inclui elementos tridimensionais para a interação.

A RA, segundo Silva e Rufino (2021), proporciona a oportunidade de interagir com objetos virtuais no mundo real, e existem inúmeras oportunidades de exploração na área da

educação. O educador pode melhorar a exposição com modelos tridimensionais muito mais detalhados que os modelos em livros didáticos tradicionais e geralmente bidimensionais. De acordo com Gonçalves, Oliveira e Vettori (2017), a realidade aumentada é um elemento motivador, pois o aluno se depara com a tecnologia da interatividade literalmente em suas mãos, além de aumentar a conexão com outros alunos. Kirner e Kirner (2007) argumentam que a RA é capaz de adicionar ao ambiente físico objetos virtuais animados e manipuláveis pelo usuário, sem a necessidade de conhecimentos computacionais.

Essas pesquisas mostram que o aprendizado pode se tornar ainda mais significativo com o uso da tecnologia RA, uma vez que ela se mostra, principalmente, como um complemento aos métodos tradicionais. Portanto, tem-se que este projeto pretende construir objetos em RA especialmente para os alunos, implementando uma atividade dinâmica que potencializa seu aprendizado e favorece a aprendizagem acerca das Leis que regem a natureza. Assim, este trabalho apresenta a construção de marcadores para a tecnologia RA e de objetos virtuais que podem ser utilizados para a construção do ensino de física. Estes marcadores podem ser acessados em uma apostila, e funcionar como um complemento aos materiais didáticos entregue aos alunos no início do curso. No entanto, estes objetos também podem ser utilizados de forma concreta com um aplicativo para Android, de modo que os alunos tenham a possibilidade de visualizar os objetos de RA e ter uma experiência interativa.

2 | METODOLOGIA

A tecnologia de RA neste projeto utiliza a captura de imagens por meio de câmeras de dispositivos móveis; ao identificar um marcador específico, os objetos virtuais são exibidos em tempo real (KIRNER, SISCOOTTO, 2006). Esses marcadores, impressos em papel A4 comum, são captados pelas câmeras dos celulares, permitindo que os alunos visualizem os objetos virtuais sobrepostos ao ambiente físico. Isso, enriquece a experiência de aprendizado com uma dimensão interativa.

Os modelos 3D utilizados no ambiente de RA foram criados no Fusion 360, um software de modelagem 3D especializado em design paramétrico. O Fusion 360 permitiu desenvolver objetos com precisão de maneira simples e intuitiva, o que facilitou bastante o aprendizado dos alunos. Depois de criados, os modelos foram exportados e integrados ao Unity para serem visualizados em RA. O uso do Fusion 360 foi fundamental para garantir que os objetos virtuais fossem realistas ao contexto educacional. Importante destacar que todas essas ferramentas aqui propostas são gratuitas e de fácil acesso e utilização.

Para criar esses objetos em RA, foi utilizado o SDK Vuforia, uma plataforma muito popular para o desenvolvimento de experiências de RA. O Vuforia, integrado ao Unity 3D, fornece um conjunto completo de ferramentas que simplificam a detecção de marcadores e o rastreamento de objetos em tempo real. Possibilitando a exibição precisa do conteúdo

na tela do aparelho, mesmo quando está em movimento. Além disso, é possível incluir diferentes interações visuais nos objetos, como modelos sobrepostos e elementos interativos que reagem às ações do aluno ao mexer o celular.

O Unity 3D foi a ferramenta responsável por reunir tudo para desenvolver a tecnologia de RA. Ela foi empregada como motor gráfico na criação do ambiente de realidade aumentada. O Unity é muito usado na criação de ambientes 3D interativos, sendo uma plataforma versátil e popular. Ela dá suporte para modelagem de alta qualidade, física realista e animações avançadas. Essa tecnologia viabiliza a formação de cenários exploratórios imersivos que facilitam interações naturais. O aluno pode manipular e visualizar os objetos virtuais em diferentes ângulos, o que ajuda a entender melhor os conceitos físicos apresentados. Além disso, o Unity facilita a integração com o Vuforia, tornando mais simples desenvolver apps para dispositivos móveis, especialmente para o Android, onde o projeto está sendo desenvolvido. Embora seja viável modelar e criar modelos 3D dentro do Unity, a escolha foi usar o Fusion 360 por sua facilidade de uso. Os itens são feitos de maneira fácil e intuitiva, tornando essa fase do projeto mais simples.

Os marcadores são definidos como elementos visuais geralmente representados por imagens impressas ou códigos, como os QR Codes, que servem como pontos de referência para ativar e posicionar objetos virtuais gerados pela RA. Assim, depois de serem reconhecidos pela câmera do aparelho, o programa consegue encontrar o objeto virtual e mostrá-lo de forma precisa na tela do celular. Cada marcador possui atributos visuais exclusivos, como desenhos de alto contraste e contornos definidos, auxiliando a identificação pelo SDK Vuforia.

Depois de criar os marcadores, uma apostila foi elaborada para reunir todos os componentes criados para o projeto. Este guia, disponível em formato físico ou eletrônico, é uma ferramenta extra para alunos e educadores, com uma lista organizada de indicadores a serem utilizados durante as aulas. Ela foi construída por tópicos com os marcadores alocados nos seus devidos subtemas da física. Dessa forma, os marcadores podem ser incorporados pelos professores em seus materiais para permitir que os alunos visualizem objetos 3D ao longo do material.

Finalmente, desenvolveu-se o app móvel RA CAP UERJ para Android que possibilita que os estudantes vejam os objetos virtuais sobrepostos ao ambiente real em tempo real através de seus smartphones. Este app, desenvolvido com o Unity e integrado ao Vuforia, utiliza a câmera do dispositivo para registrar a imagem dos marcadores e colocar os objetos virtuais de maneira exata na tela. A interface do aplicativo foi projetada para ser de fácil utilização e intuitiva, de forma que os estudantes consigam interagir com os elementos virtuais sem problemas técnicos. Apenas é preciso que o estudante abra o app e direcione a câmera para o marcador, para que o item virtual seja criado.

Dessa maneira, a metodologia para implementação da Realidade Aumentada começa com a criação de um marcador para um objeto 3D específico. Paralelamente, o modelo

3D correspondente é desenvolvido no Fusion 360. Com o marcador e o objeto 3D prontos, ambos são importados para o Unity, que deve estar integrado ao Vuforia para possibilitar a implementação da RA. No Unity, realiza-se a integração dos marcadores e dos objetos 3D, onde também são definidas as propriedades físicas, como a aplicação de efeitos de gravidade, ou se o objeto será estático, como no caso de uma lente biconvexa. Após essas configurações, o Unity integrado ao Android Studio permite a criação de um aplicativo móvel que implementa a RA. Uma vez estabelecido esse processo, é possível criar uma linha de produção para desenvolver outros objetos e marcadores, formando gradualmente a apostila de marcadores. Com o aumento de objetos no sistema, surgem desafios adicionais, como instabilidades de marcadores semelhantes, mas que podem ser contornados com ajustes específicos.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira etapa dos resultados está relacionada à criação e aos testes iniciais dos marcadores desenvolvidos para o ambiente de RA. Para o primeiro teste, um marcador denominado Lente Biconvexa foi criado, conforme mostrado na Figura 1, com o objetivo de avaliar o funcionamento básico e a estabilidade da RA.

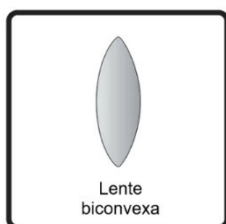


Figura 1. Primeiro marcador de testes para o objeto Lente Biconvexa.

Utilizando objetos prontos do próprio *Unity*, posicionou-se um cubo sobre o marcador para realizar o teste inicial, como exibido nas Figuras 2 e 3. A escolha do cubo deve-se à simplicidade e à facilidade de implementação, proporcionando uma visualização rápida do comportamento da RA.

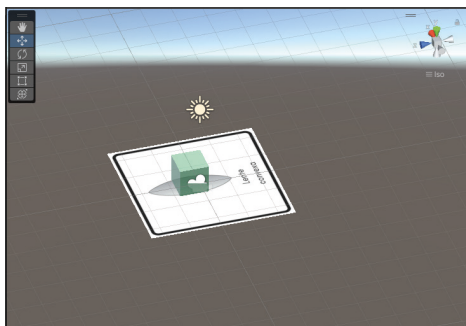


Figura 2. Cubo padrão do *Unity* posicionado sobre o marcador no ambiente de desenvolvimento do *Unity*.

Na Figura 2, observa-se o cubo verde posicionado sobre o marcador no ambiente de desenvolvimento do *Unity*. Este primeiro teste permitiu ajustar a altura e a posição do objeto virtual em relação ao marcador, simulando a sobreposição esperada no dispositivo móvel. Embora a RA ainda não estivesse implementada diretamente em um celular, foi possível simular o funcionamento no computador utilizando uma *webcam* para emular a câmera do dispositivo. A Figura 3 mostra essa visualização inicial, permitindo observar o comportamento da RA em tempo real.

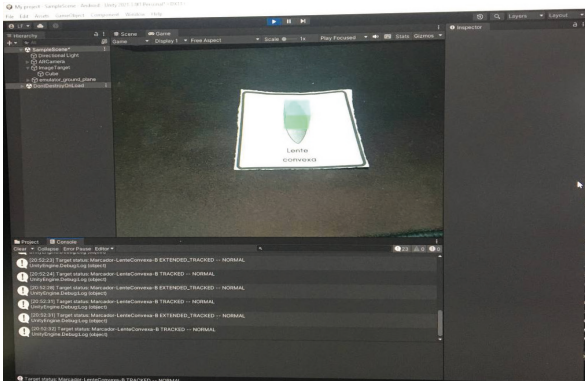


Figura 3. Visualização da RA gerada pela webcam do computador para testes.

Na Figura 3, o cubo 3D é gerado conforme definido no *Unity*, demonstrando que o marcador funciona como ponto de referência. Após este primeiro teste, adotou-se um modelo simplificado de lente para verificar parâmetros adicionais da RA, como a estabilidade do objeto sobre o marcador. A Figura 4 apresenta o objeto flutuando sobre o marcador, resultado de ajustes na altura e posição.

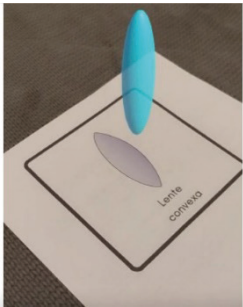


Figura 4. Visualização do formato simplificado flutuando sobre o marcador inicial.

Uma observação interessante, mostrada na Figura 5, envolve a passagem da mão sob o objeto virtual, algo que estudantes frequentemente tentam ao explorar a RA. Esse experimento demonstrou uma leve oscilação do objeto para a esquerda, indicando que o *Vuforia* apresenta limitações na detecção precisa do marcador em alguns ângulos. Embora

o *software* ainda consiga segurar o objeto no lugar, esse marcador mostrou-se instável quando testado sob condições mais exigentes.

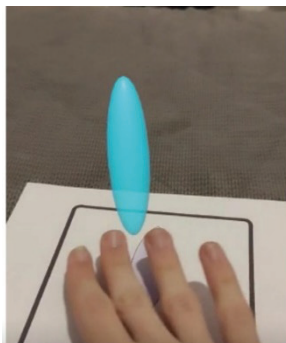


Figura 5. Visualização da passagem da mão sobre o marcador.

Conforme o projeto avançou e mais marcadores foram integrados, identificou-se que o marcador inicial era inadequado para a produção da apostila de marcadores, que visa conter mais de 100 referências. Em testes subsequentes, os objetos 3D perdiam sua estabilidade na tela do celular, evidenciando a dificuldade do *Vuforia* em localizar corretamente a referência com marcadores mais simples. Para solucionar isso, adotou-se um novo tipo de marcador com mais pontos de referência, como ilustrado na Figura 6. Esse novo marcador consegue garantir uma maior estabilidade na geração dos objetos 3D.

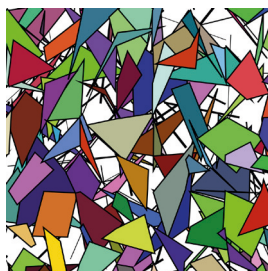


Figura 6. Novo marcador com mais pontos de referência, ideal para maior estabilidade na RA.

O marcador exibido na Figura 6, que possui mais detalhes e contrastes, foi considerado ideal pela ferramenta *Vuforia*, garantindo maior estabilidade e permitindo a geração simultânea de diversos objetos 3D. Embora o marcador inicial fosse visualmente mais simples e intuitivo, ele foi descartado devido à sua instabilidade. Definido o tipo de marcador mais adequado, iniciou-se a modelagem dos objetos virtuais específicos, como a lente biconvexa, no *Fusion 360*.

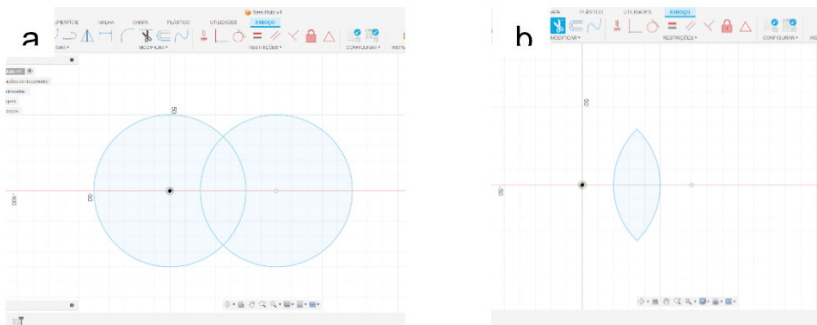


Figura 7. a) Esboço inicial com dois círculos; b) Esboço finalizado da lente biconvexa no *Fusion 360*.

A Figura 7 demonstra o processo de criação da lente biconvexa no *Fusion 360*. Primeiramente, foram criados dois círculos de raios iguais, dispostos de forma a se sobreporem, para esboçar a forma básica da lente. As partes externas à intersecção dos círculos foram então eliminadas, criando o esboço primário. Em seguida, aplicou-se a revolução do esboço ao longo do eixo de simetria, resultando na criação tridimensional da lente biconvexa, como ilustrado na Figura 8.

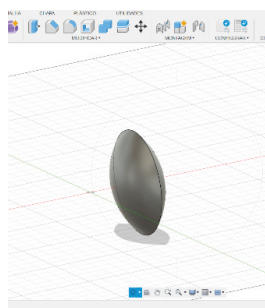


Figura 8. Lente biconvexa finalizada no *Fusion 360*.

Com a lente biconvexa finalizada, o modelo foi salvo e exportado para o *Unity*, onde foi integrado ao ambiente de RA. Esse processo é repetido para todos os demais objetos criados, com cada modelo passando pelas etapas de ajuste e validação, garantindo que cada marcador e objeto estejam prontos para uso na apostila de marcadores. Dessa maneira, foram produzidos também outros objetos ópticos, como lentes e prismas, que podem ser vistos nas Figuras 9 e 10.



Figura 9. Grupo de 3 lentes convergentes geradas ao mesmo tempo.

Na Figura 9, observa-se um conjunto de lentes convergentes, cada uma gerada em seu respectivo marcador. Os marcadores foram organizados lado a lado, simulando a disposição que teriam em uma página de apostila ou lista de exercícios. É possível notar que os objetos são gerados de forma independente, sem interferência mútua. Um exemplo disso é a proximidade entre as lentes da esquerda e a central, que chegam a se tocar, mas continuam sendo geradas corretamente, sem interferências ou sobreposições incorretas. Esse teste demonstra a estabilidade e precisão deste tipo de marcador, comprovando sua viabilidade para uso contínuo. Neste caso, a RA foi gerada por um tablet com sistema Android, validando o funcionamento do aplicativo em dispositivos móveis.



Figura 10. Na esquerda, grupo de 3 marcadores; na direita, grupo de 3 prismas gerados simultaneamente.

Na Figura 10, observa-se três marcadores dispostos sobre uma mesa simples. Esses marcadores foram impressos em tamanho grande, mas podem ser reduzidos a quadrados de 88 mm de lado, se necessário. Utilizando um tablet para visualizar a RA, vê-se os prismas projetados, cada um associado ao seu marcador correspondente. Nota-se que o prisma à direita está na posição horizontal, uma configuração feita propositalmente para

testar a flexibilidade e a orientação dos objetos virtuais no *software*. Esse teste demonstrou a capacidade do sistema de gerar simultaneamente diferentes prismas, validando a estabilidade e precisão dos marcadores.

Para enriquecer a experiência visual e tornar os conteúdos mais interessantes para o aluno, foram criados modelos que incorporam efeitos de raios de luz atravessando as lentes ou prismas, como mostrado na Figura 11. Esses raios de luz são estáticos e foram integrados diretamente aos objetos virtuais. Essa abordagem permite que o aluno observe o fenômeno da refração ao longo de uma lente ou prisma, ilustrando de forma visual o comportamento dos raios de luz em meios ópticos.



Figura 11. Visualização dos raios de luz passando pelas 3 lentes.

Após a implementação dos objetos ópticos, como lentes e prismas, explorou-se também as simulações físicas oferecidas pelo *Unity*, com o objetivo de testar o comportamento de uma esfera sob efeito da aceleração gravitacional em um ambiente de RA. O experimento consistiu na criação de uma caixa virtual fechada, que pode ser vista na Figura 12, contendo uma esfera maciça. Esta caixa delimita o volume dentro do qual a esfera pode se mover. Ela serve apenas como referência para definir as condições de contorno necessárias para a simulação.

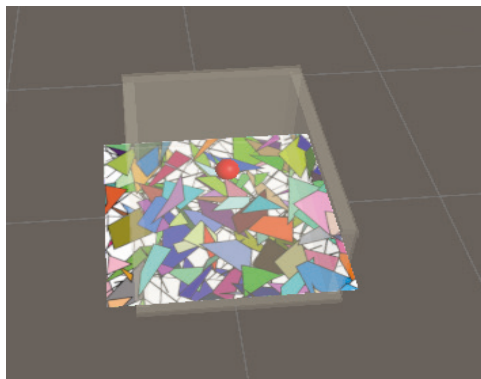


Figura 12. Esfera maciça dentro do volume de referência sobre o marcador no *Unity*.

Na Figura 12, observa-se a configuração no *Unity* para implementação da RA. Esse volume de controle pode ser definido como invisível posteriormente. A Figura 13 mostra esse objeto já implementado e em funcionamento pelo aplicativo.

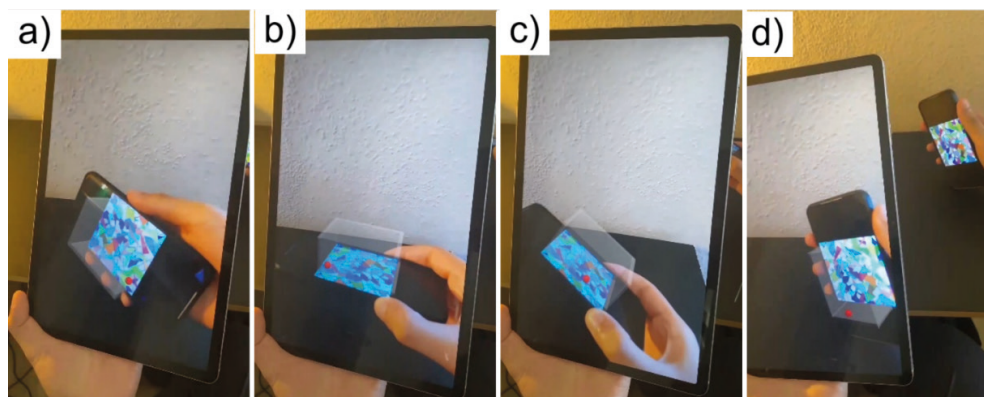


Figura 13. Esfera maciça dentro do volume de referência em RA.

Na Figura 13, observa-se o funcionamento do experimento: ao inclinar o marcador de um lado para o outro, a esfera responde à mudança de orientação, movendo-se em direção ao lado inclinado e simulando o efeito da gravidade. Na Figura 13b, o objeto é mostrado em repouso sobre o marcador posicionado horizontalmente. Quando o marcador é inclinado para a esquerda, a esfera desliza para o mesmo lado, como ilustrado na Figura 13a. Ao inclinar o marcador para a direita, a esfera desliza para a direita, conforme mostrado na Figura 13c. Esse comportamento demonstra que a ferramenta consegue atribuir propriedades físicas aos objetos e simular fenômenos de maneira satisfatória. Além disso, ao virar o marcador completamente, observa-se que a esfera permanece dentro do volume de referência virtual associado ao marcador, como mostrado na Figura 13d. Essa capacidade abre a possibilidade de futuras expansões do projeto para a criação

de volumes de referência maiores, como os necessários para a implementação de um lançador oblíquo. Outro aspecto importante é que o valor da aceleração gravitacional pode ser ajustado, permitindo que o movimento da esfera seja mais lento ou mais rápido.

Na Figura 13d, também é demonstrada a utilização de um celular com uma foto do marcador no lugar do marcador de papel, enquanto a RA é gerada no tablet com sistema Android. Esse recurso exemplifica a flexibilidade da RA, que pode funcionar tanto com marcadores físicos quanto digitais.

Com a finalização dos objetos e marcadores iniciais e com o aplicativo pronto, foi criada uma apostila de marcadores para organizar e disponibilizar o material de forma acessível. A apostila, ilustrada na Figura 14, compila todos os marcadores de lentes, prismas e outros objetos, permitindo que os alunos utilizem o aplicativo para explorar cada conceito em profundidade. Ademais, a proposta é que os docentes possam facilmente encontrar e baixar esse conteúdo na página oficial do grupo de pesquisa (ROBERTO *et al.*, 2023).

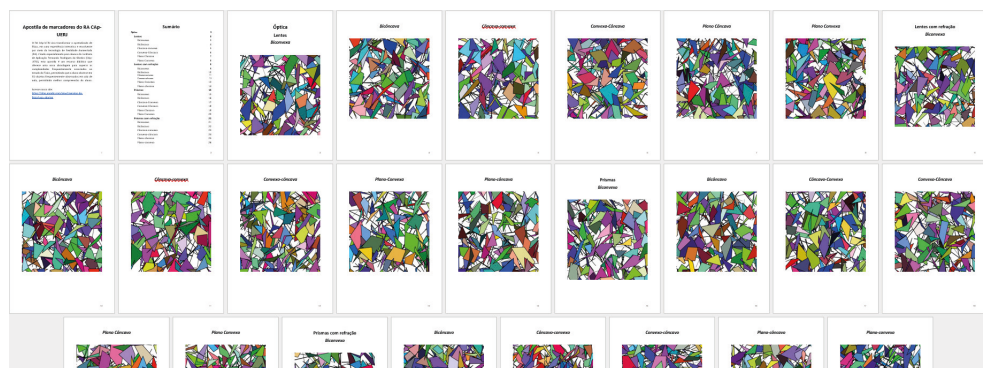


Figura 14. Apostila de marcadores com conteúdo de lentes e prismas.

Com a implementação e integração de todos os elementos - o aplicativo RA CAP UERJ, a apostila de marcadores e os objetos virtuais - concluídos, este projeto oferece uma solução completa para incentivar um ensino interativo e dinâmico de Física.

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foi mostrado o progresso de uma ferramenta educacional inovadora, que une Realidade Aumentada com modelos virtuais de conceitos ópticos, como lentes e prismas, para melhorar o ensino de Física. Usando uma abordagem que combinou o Fusion 360, Unity e o SDK Vuforia, foi viável desenvolver elementos tridimensionais interativos e um guia com marcadores, que possibilita aos estudantes uma exploração aprofundada de cada conceito. Também, o app móvel RA CAP UERJ, criado para o Android e quase pronto para ser lançado na Google Play, já pode ser baixado no site do projeto (ROBERTO et al., 2023).

Até agora, a apostila de marcadores contém 24 itens ligados à seção de lentes e prismas, dispostos de forma a facilitar o acesso e a utilização pelos docentes em sala de aula. A atualização constante do material e o empenho na introdução de novos conteúdos em Realidade Aumentada têm como objetivo satisfazer as demandas pedagógicas dos docentes e oferecer aos estudantes uma experiência de aprendizado prática e visualmente cativante. A implementação de marcadores aprimorados, após várias fases de testes, garantiu a estabilidade e exatidão requeridas para o bom funcionamento do aplicativo em variados aparelhos.

O grupo planeja expandir o conteúdo da apostila e do aplicativo no futuro, introduzindo novos objetos de Realidade Aumentada voltados para a mecânica, tratando de tópicos como planos inclinados, lançamentos horizontais e oblíquos. Estes novos materiais possibilitarão aos estudantes investigarem fenômenos básicos da mecânica de maneira interativa, empregando a Realidade Aumentada para visualizar e entender conceitos dinâmicos de movimento e forças. De modo que, a expansão constante da apostila e o aprimoramento do aplicativo são etapas cruciais para estabelecer este projeto como um padrão em recursos pedagógicos interativos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

REFERÊNCIAS

ANDROID STUDIO. Android Studio: plataforma de desenvolvimento para Android. Versão: 2021.3.1. Disponível em: <https://developer.android.com>. Acesso em: 30 ago. 2024.

BARROSO, Marta F.; RUBINI, Gustavo; SILVA, Tatiana da. Dificuldades na aprendizagem de Física sob a ótica dos resultados do Enem. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 40, n. 4, e4402, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0059>. Acesso em: 5 abr. 2022.

GONÇALVES, R. L.; OLIVEIRA, L. D.; VETTORI, M. Avaliação do desenvolvimento de ambientes de realidade aumentada elaborados por alunos do ensino médio em aulas de física. In: **ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS – ENPEC**, 11., 2017, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: ABRAPEC, 2017. p. 1–8.

KIRNER, Cláudio; KIRNER, Tereza G. Virtual reality and augmented reality applied to simulation visualization. In: EL SHEIKH, A. A. R.; AL AJEELI, A.; ABUTAIH, E. M. O. (Org.). **Simulation and modeling: current technologies and applications**. 1. ed. Hershey-NY: IGI Publishing, 2007.

REZENDE, Sandro M.; GONÇALVES, Juanice D. B.; PINTO, Sergio C. C. S.; DELOU, Cristina M. C. A realidade aumentada em situações de aprendizagem na educação básica: uma revisão de literatura. In: **WORKSHOP SOBRE AS IMPLICAÇÕES DA COMPUTAÇÃO NA SOCIEDADE – WICS**, 2., 2021, Evento Online. **Anais [...]**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2021. p. 102–111. ISSN 2763-8707. DOI: <https://doi.org/10.5753/wics.2021.15968>.

ROBERTO, T. D. *et al.* Realidade aumentada no ensino de Física. Disponível em: <https://sites.google.com/view/raensino-de-fisica/p%C3%A1gina-inicial>. Acesso em: 20 out. 2024.

SILVA, L. G. P. da; RUFINO, H. L. P. Revisão sistemática sobre as vantagens e desafios no uso de realidade aumentada como ferramenta pedagógica no ensino médio. **Educação**, v. 46, n. 1, p. e38/1–31, 2021. DOI: 10.5902/1984644442392. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reveducacao/article/view/42392>. Acesso em: 7 abr. 2022.

TORI, R.; KIRNER, C.; SISCOOTTO, R. **Fundamentos e tecnologia de realidade virtual e aumentada**. Porto Alegre: SBC, 2006.

UNITY. Unity: plataforma para desenvolvimento de ambientes 3D e realidade aumentada. Versão: 2021.3.8f1. Disponível em: <https://unity.com/pt>. Acesso em: 30 ago. 2024.

VUFORIA. Vuforia: kit de desenvolvimento de software para realidade aumentada. Versão: 10.9.3. Disponível em: <https://developer.vuforia.com>. Acesso em: 30 ago. 2024.

ZULIAN, Margaret Simone; FREITAS, Soraia Napoleão. Formação de professores na educação inclusiva: aprendendo a viver, criar, pensar e ensinar de outro modo. **Revista de Educação Especial**, Santa Maria, UFSM, n. 18, 2001. Disponível em: <http://cascavel.cpd.ufsm.br/revistas/ojs2.2.2/index.php/educacaoespecial/article/view/5183>. Acesso em: 7 abr. 2022.

FABRÍCIO MORAES DE ALMEIDA - Professor do Departamento de Engenharia Elétrica – UFRO e Professor/Pesquisador do Programa de Doutorado PGDRA/UFRO. É Doutor em Física pela UFC (2005) com pós-doutorado (2009) – e para saber mais, acesse: RESEARCHGATE – ID: <https://www.researchgate.net/profile/Fabricio-Almeida>

A

Aplicativos Android 218

Aprendizagem Interativa 209

B

Baixada Cuiabana 35, 36, 38, 39, 42, 43, 44, 45, 62, 63, 73

Barragens de rejeito 35, 36, 40, 49, 62, 63

Bixa orellana 121, 122, 128, 129, 130, 131, 132

Bixina 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 130, 131, 132

C

Cassava o Yuca Peruana 81

Cianuro 81, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92

Circuitos RLC 173, 174, 178, 181

Compuestos bioactivos 133, 137, 140

D

Dermocosmético 121

Desenvolvimento econômico 2, 3, 8, 10, 13, 14, 20, 28, 32, 33

Desenvolvimento regional 1, 2, 4, 5, 15, 23, 27, 28, 30, 31, 33

Destilação 157, 158, 164, 168, 169, 170

Detoxificación 81, 85, 87, 89

Diferenças Finitos 187

Dopamina 94, 95, 97, 100, 101, 105, 106, 109, 116

E

Economic transformations 2

Educação Matemática 209, 216

Elementos Finitos 187, 188, 189, 192, 193, 204, 206, 207, 208

Empreendimentos hidrelétricos 1, 2, 3, 4, 15

Engenharia Elétrica 173, 174, 175, 177, 178, 179, 181, 182, 185, 186, 231

Ensino de Física 217, 218, 219, 229

Erosão Urbana 64

Exercícios Automatizados 209

F

Ferramentas computacionais 173, 175, 180, 182

Fluidos 35, 133, 187, 188, 189, 192, 200, 207, 208

G

Geofísica 35, 46, 60, 61, 62, 63

Geotecnia 35, 46, 62, 64

Gerenciamento de resíduos 157, 158, 159, 160, 165, 170, 171, 172

Glucósidos cianogénicos 81, 82, 83, 84, 85, 89

I

Impedância 173, 177, 178, 179, 183, 185

Indicadores 12, 18, 19, 33, 147, 220

Inestabilidade termodinâmica 133

Inspecção visual 37, 64, 65, 67, 70, 71, 78

M

Maple 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216

Metais 23, 97, 100, 147, 157, 163

Metalografia 147

Método de Euler 187, 188, 189, 190, 200, 207

Métodos Quantitativos 2

N

Neutralização 158, 160, 163, 165, 166

Números complexos 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186

P

Precipitação 41, 66, 157, 158, 160, 163, 164, 166, 167, 170

Produtos naturais 121, 127

Q

Quantitative Methods 2

R

Reagentes 103, 147, 148, 155, 160, 170, 171

Realidade aumentada 217, 218, 219, 220, 228, 229, 230

S

Sensor fotoeletroquímico 95, 101, 102, 111

Supressão 106, 147, 149, 152, 153

Surfactantes 133, 140

T

Tecnologias Educacionais 218

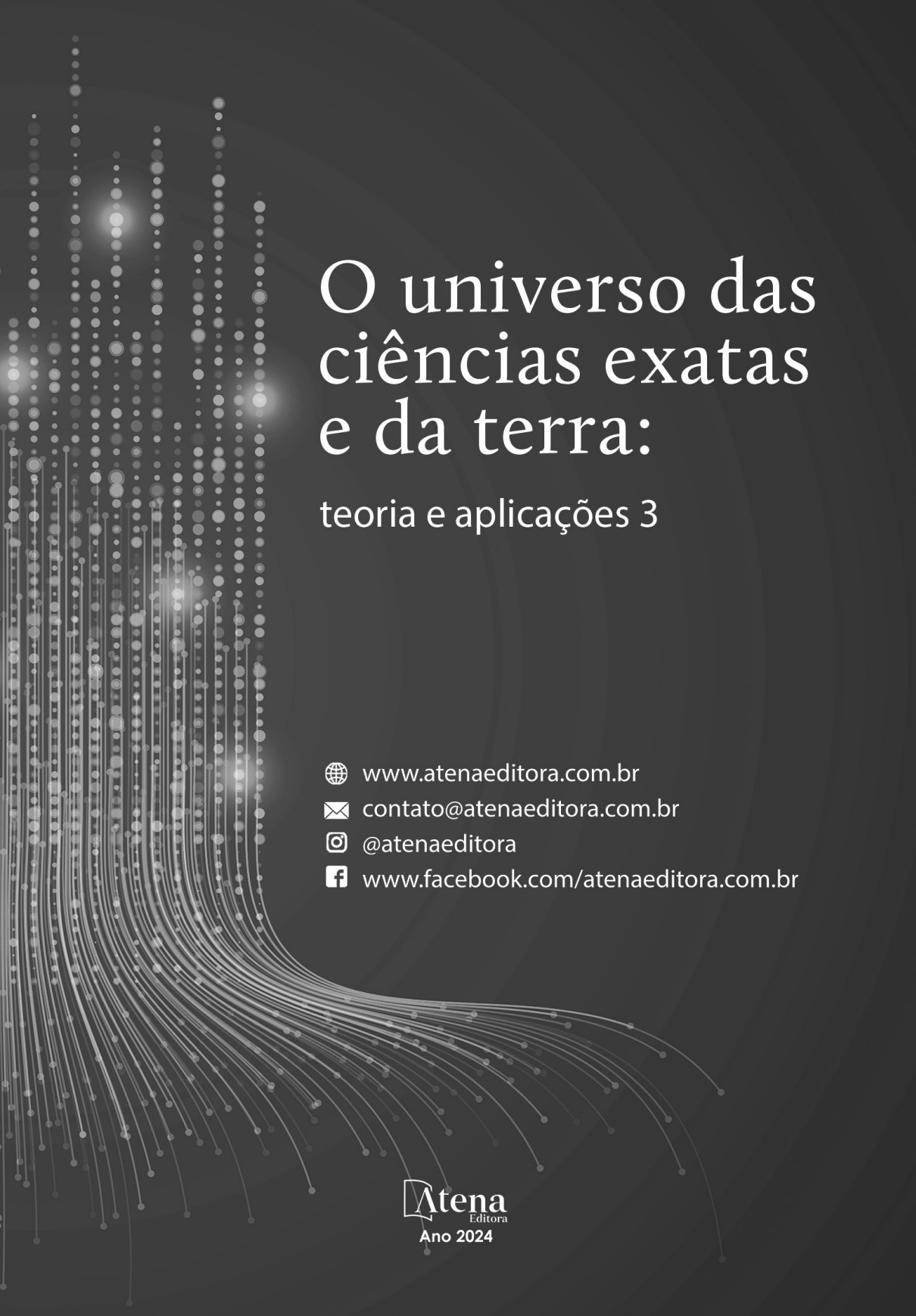
TiO₂ 94, 95, 96, 97, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119

Tomografia de Resistividade Elétrica 35

V

Voçoroca 64, 65, 66, 67

Volumes Finitos 187, 189, 192, 196, 201, 202, 203, 204, 207, 208



O universo das ciências exatas e da terra:

teoria e aplicações 3

🌐 www.atenaeditora.com.br
✉ contato@atenaeditora.com.br
📷 @atenaeditora
📘 www.facebook.com/atenaeditora.com.br



O universo das ciências exatas e da terra:

teoria e aplicações 3

🌐 www.atenaeditora.com.br
✉ contato@atenaeditora.com.br
📷 @atenaeditora
📘 www.facebook.com/atenaeditora.com.br