

CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

ESTUDOS APLICADOS EM BOTÂNICA

ORGANIZADORES
IGOR LUIZ VIEIRA DE LIMA SANTOS
CARLIANE REBECA COELHO DA SILVA



1ª

Edição

Acesso livre ao E-Book em
WWW.EDITORASCIENCE.COM.BR

 EDITORA
SCIENCE
ANO 2024



CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

ESTUDOS APLICADOS EM BOTÂNICA

ORGANIZADORES
IGOR LUIZ VIEIRA DE LIMA SANTOS
CARLIANE REBECA COELHO DA SILVA



1ª

Edição

Acesso livre ao E-Book em
WWW.EDITORASCIENCE.COM.BR

CAMPINA GRANDE-PB

 EDITORA
SCIENCE
ANO 2024

Todos os Direitos Desta Edição Reservados à
© 2024 EDITORA SCIENCE
Av. Marechal Floriano Peixoto. 5000.
Campina Grande, PB, 58434-500.
CNPJ: 42.754.503/0001-00

REGISTRO CBL (Câmara Brasileira do Livro)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Estudos aplicados em botânica [livro eletrônico] :
ciências biológicas / organização Igor Luiz
Vieira de Lima Santos, Carliane Rebeca Coelho
da Silva. -- 1. ed. -- Campina Grande, PB :
Ed. dos Autores, 2024.
PDF

Vários autores.
Bibliografia.
ISBN 978-65-00-98131-5

1. Botânica 2. Plantas - Anatomia 3. Plantas -
Biotecnologia 4. Plantas - Catálogos 5. Plantas
(Botânica) I. Santos, Igor Luiz Vieira de Lima.
II. Silva, Carliane Rebeca Coelho da.

24-199648

CDD-581.4

Índices para catálogo sistemático:

1. Plantas : Botânica 581.4

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129



<https://doi.org/10.56001/24.9786500981315>

Para consulta na CBL acesse: <https://www.cbldados.org.br/isbn/pesquisa/>



Editora–Chefe

Pós-Dra. Carliane Rebeca Coelho da Silva

Editores Organizadores

Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos

Pós-Dra. Carliane Rebeca Coelho da Silva

Editoração e Diagramação

Corpo Técnico da Editora Science

Revisão Principal/Por Pares

Os Autores / Revisores *Ad Hoc* / Corpo
Editorial / Organizadores

Revisão Final

Pós-Dra. Carliane Rebeca Coelho da Silva

Programas Registrados de Design

©Canva Pro Registered Design



Copyright © 2024 Editora Science

Copyright Textual © 2024 Os autores

*Copyright da Edição © 2024 Editora
Science*

*Todos os Direitos e os Termos de Cessão de
Direitos Autorais para esta edição foram
cedidos à Editora Science pelos próprios
autores.*

Declaração de Direitos

Todos os direitos reservados.

Qualquer parte deste livro pode ser reproduzida, transmitida de qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotocópia, microfilmagem, gravação ou de outra forma, desde que citada a fonte. Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Todos os artigos de autoria inédita, revisão, comentários, opiniões, resultados, conclusões ou recomendações são de inteira responsabilidade do(s) autor(es), e não refletem necessariamente as opiniões dos editores e/ou da empresa.

Para cópias impressas, para compras em massa e/ou informações sobre este e outros títulos da © Editora Science, entre em contato com a editora pelo telefone: Tel.: +55-83-991647953; E-mail: contato@editorascience.com ou editorascience@gmail.com

Siga nossas redes sociais fique por dentro das novidades e amplie o alcance dos nossos livros:

Facebook: <http://www.facebook.com/editorascience>

Instagram: <https://www.instagram.com/editorascience>

© 2024 EDITORA SCIENCE

EDITORA-CHEFE:

PÓS-DRA. CARLIANE REBECA COELHO DA SILVA (EDITORA-CHEFE)

GERENTE EDITORIAL:

PROF. DR. IGOR LUIZ VIEIRA DE LIMA SANTOS (UFCG)

CONSELHO EDITORIAL:

PÓS-DRA. CARLIANE REBECA COELHO DA SILVA (EDITORA-CHEFE)

PROF. DR. IGOR LUIZ VIEIRA DE LIMA SANTOS (UFCG)

DRA. LUCIANA AMARAL DE MASCENA COSTA (UFRPE)

PÓS-DRA. AYRLES FERNANDA BRANDÃO DA SILVA (UFCE)

CORPO EDITORIAL:

DR. MARCUS VINICIUS PERALVA SANTOS (IFTO)

DR. RÔMULO ALVES DE OLIVEIRA (IFSE)

DRA. ROSEANNE SANTOS DE CARVALHO (IFSE)

PÓS-DRA. CARLIANE REBECA COELHO DA SILVA (EDITORA-CHEFE)

DRA. FERNANDA MIGUEL DE ANDRADE (FMSE-CESPU-EUROPA)

DR. MILTON GONÇALVES DA SILVA JUNIOR (UNIARAGUAIA)

DRA. WELMA EMÍDIO DA SILVA (FIS)

PÓS-DRA. AYRLES FERNANDA BRANDÃO DA SILVA (UFCE)

DR. GABRIEL PARISOTTO (UNISUAM)

DR. IGOR LUIZ VIEIRA DE LIMA SANTOS (UFCG)

MSC. LÚCIA MAGNÓLIA A. SOARES DE CAMARGO (UNIFACISA)

DRA. LUCIANA AMARAL DE MASCENA COSTA (UFRPE)

MSC. MARCELO SALVADOR CELESTINO (UNESP)

PÓS-DRA. ELIANA NAPOLEÃO COZENDEY DA SILVA (FIOCRUZ-ENSP)

DR. EDIGAR HENRIQUE VAZ DIAS (UFCAT)

DR. HENRIQUE MACIEL VIEIRA DE MORAES (UFRJ)

PÓS-DR. CRISTIANO CUNHA COSTA (UFS)

MSC. DANIEL DA SILVA GOMES (UFPB)

DRA. FRANCIELI DE FATIMA MISSIO (UFMS)

DR. JOSÉ OLÍVIO LOPES VIEIRA JÚNIOR (UENF)

DR. LUIZ ALEXANDRE VALADÃO DE SOUZA (SME-RJ)

PÓS-DRA. MICHELE APARECIDA CERQUEIRA RODRIGUES (UFLO)

PÓS-DR. MARCOS PEREIRA DOS SANTOS (FACUR)

LICENSE PUBLICATION DETAILS

Copyright © 2024 Editora Science

Copyright Notice

All content in this work, except where otherwise noted, is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0) license which permits copying, distribution, and adaptation of the work, provided the original work is properly cited and any changes from the original work are properly indicated. Any altered, transformed, or adapted form of the work may only be distributed under the same or similar license to this one.

© 2024 by Carliane Rebeca Coelho da Silva is licensed under Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International 



**Attribution-NonCommercial-
NoDerivatives 4.0 International
(CC BY-NC-ND 4.0)**

HOW CITE THIS BOOK:

NLM Citation

Santos ILVL, Silva CRC, editor. *Estudos Aplicados em Botânica*. 1st ed. Campina Grande (PB): Editora Science; 2024.

APA Citation

Santos, I. L. V. L. & Silva, C. R. C. (Eds.). (2024). *Estudos Aplicados em Botânica*. (1st ed.). Editora Science.

ABNT Brazilian Citation NBR 6023:2018

SANTOS, I. L. V. L.; SILVA, C. R. C. **Estudos Aplicados em Botânica**. 1. ed. Campina Grande: Editora Science, 2024.

WHERE ACCESS THIS BOOK:

www.editorascience.com.br/

Sumário

CAPÍTULO 1	1
MODIFICAÇÕES ANATÔMICAS EM RAÍZES DE <i>ELAEIS GUINEENSIS</i> JACQ. SUBMETIDAS AO ALAGAMENTO	1
MORPHOLOGICAL MODIFICATIONS OF <i>ELAEIS GUINEENSIS</i> JACQ. ROOTS SUBJECTED TO FLOODING	1
DOI: https://doi.org/10.56001/24.9786500981315.01	1
Nara Helena Tavares da Ponte	1
Rodolfo Inacio Nunes Santos	1
Roberto Lisboa Cunha	1
Marcelo Murad Magalhães	1
Ana Catarina Siqueira Furtado	1
Fernanda Ilkiu Borges de Souza	2
Hugo Alves Pinheiro	2
CAPÍTULO 2	10
HOMEOPATIA NA AGRICULTURA	10
HOMEOPATHY IN AGRICULTURE	10
DOI: https://doi.org/10.56001/24.9786500981315.02	10
Magna Maria Macedo Nunes Costa	10
CAPÍTULO 3	24
SAZONALIDADE DO PREÇO DA SOJA GRÃO NO ESTADO DA BAHIA ENTRE OS ANOS DE 2010 E 2020	24
SEASONALITY OF SOYBEAN GRAIN PRICES IN THE STATE OF BAHIA BETWEEN 2010 AND 2020	24
DOI: https://doi.org/10.56001/24.9786500981315.03	24
Leone Ricardo de Carvalho Santana	24
Bruno Augusto Gama dos Santos	24
Luísa Correia Oliveira	24
Sandra Selma Marques de Souza	24
Damiana Amancio de Souza	24
Luiz Edmundo Cincura de Andrade Sobrinho	25
Jamile Maria Oliveira do Nascimento Vieira	25
Raissa Homem Gonçalves	25
Ossival Lolato Ribeiro	25
Emellinne Ingrid de Sousa Costa	25
CAPÍTULO 4	40

MECANISMOS DE SOLUBILIZAÇÃO DE FÓSFORO POR MICORRIZAS E NUTRIÇÃO FOSFATADA	40
MECHANISMS OF PHOSPHORUS SOLUBILIZATION BY MYCORRHIZAE AND PHOSPHORUS NUTRITION	40
DOI: https://doi.org/10.56001/24.9786500981315.04	40
Damiana Amancio de Souza	40
Mariana Dantas Silva	40
Larissa dos Santos Machado	40
Maria Selma dos Santos Silva	40
Sandra Selma Marques de Souza	40
Leone Ricardo de Carvalho Santana	41
Luiz Edmundo Cincura de Andrade Sobrinho	41
Daniele Oliveira Cunha	41
Camilla Pereira Furtado de Souza	41
Ossival Lolato Ribeiro	41

CAPÍTULO 5 **53**

PRODUÇÃO E CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS DE CULTIVARES DE CAPIM ELEFANTE (<i>PENNISETUM PURPUREUM</i> SCHUM.), COM E SEM ADUBAÇÃO, NO PERÍODO DAS ÁGUAS, NO RECÔNCAVO DA BAHIA	53
PRODUCTION AND AGRONOMIC CHARACTERISTICS OF ELEPHANT GRASS CULTIVARS (<i>PENNISETUM PURPUREUM</i> SCHUM.), WITH AND WITHOUT FERTILIZATION, DURING THE RAINY SEASON IN THE RECÔNCAVO OF BAHIA	53
DOI: https://doi.org/10.56001/24.9786500981315.05	53
Sandra Selma Marques de Souza	53
Leone Ricardo de Carvalho Santana	53
Bruno Augusto Gama dos Santos	53
Luísa Correia Oliveira	53
Damiana Amancio de Souza	54
Luiz Edmundo Cincura de Andrade Sobrinho	54
Jamile Maria Oliveira do Nascimento Vieira	54
Raissa Homem Gonçalves	54
Ossival Lolato Ribeiro	54
Emellinne Ingrid de Sousa Costa	54

CAPÍTULO 6 **68**

RECOMENDAÇÕES PARA IDADE DE CORTE EM CULTIVARES DE CAPIM-ELEFANTE (<i>PENNISETUM PURPUREUM</i> SCHUM.) NO PERÍODO DE SECA NO RECÔNCAVO DA BAHIA	68
RECOMMENDATIONS FOR CUTTING AGE IN ELEPHANT GRASS CULTIVARS (<i>PENNISETUM PURPUREUM</i> SCHUM.) DURING THE DRY SEASON IN THE RECÔNCAVO OF BAHIA	68
DOI: https://doi.org/10.56001/24.9786500981315.06	68

Leone Ricardo de Carvalho Santana	68
Bruno Augusto Gama dos Santos	68
Luísa Correia Oliveira	68
Sandra Selma Marques de Souza	68
Damiana Amancio de Souza	69
Luiz Edmundo Cincura de Andrade Sobrinho	69
Jamile Maria Oliveira do Nascimento Vieira	69
Raissa Homem Gonçalves	69
Ossival Lolato Ribeiro	69
Emellinne Ingrid de Sousa Costa	69

CAPÍTULO 7 **83**

VARIAÇÃO MORFOLÓGICA EM RAÍZES DE ESPÉCIES DE PLANTAS CULTIVADAS E SEU IMPACTO NA ABSORÇÃO DE NUTRIENTES	83
MORPHOLOGICAL VARIATION IN ROOTS OF CULTIVATED PLANT SPECIES AND ITS IMPACT ON NUTRIENT ABSORPTION	83
DOI: https://doi.org/10.56001/24.9786500981315.07	83
Jordana Caroline Nagel	83

CAPÍTULO 8 **95**

MUDANÇAS CLIMÁTICAS E ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO	95
CLIMATE CHANGE AND MITIGATION STRATEGIES	95
DOI: https://doi.org/10.56001/24.9786500981315.08	95
Magna Maria Macedo Nunes Costa	95

CAPÍTULO 9 **112**

CULTURA DE TECIDOS VEGETAIS: A REGULAÇÃO HORMONAL NO CONTROLE DO DESENVOLVIMENTO	112
PLANT TISSUE CULTURE: HORMONAL REGULATION IN THE CONTROL OF DEVELOPMENT	112
DOI: https://doi.org/10.56001/24.9786500981315.09	112
Jordana Caroline Nagel	112
Natália Heinzmann	112

CAPÍTULO 10 **127**

BIOESTIMULANTES VEGETAIS	127
DOI: https://doi.org/10.56001/24.9786500981315.10	127
Magna Maria Macedo Nunes Costa	127

CAPÍTULO 11 **145**

ESTRATÉGIAS DE ADAPTAÇÃO FISIOLÓGICA EM PLANTAS DE DIFERENTES AMBIENTES	145
PHYSIOLOGICAL ADAPTATION STRATEGIES IN PLANTS FROM DIFFERENT ENVIRONMENTS	145
DOI: https://doi.org/10.56001/24.9786500981315.11	145
Jordana Caroline Nagel	145
<u>SOBRE OS ORGANIZADORES DO LIVRO DADOS CNPQ:</u>	161

PREFÁCIO À 1ª EDIÇÃO

É com grande entusiasmo que apresentamos a primeira edição deste notável livro de trabalhos dedicados aos estudos aplicados em botânica. A botânica, ciência milenar que investiga os segredos e maravilhas do reino vegetal, tem desempenhado um papel crucial na compreensão da vida em nosso planeta. Através de séculos de observação, experimentação e pesquisa, os botânicos têm desvendado os mistérios das plantas e explorado seu potencial para o benefício da humanidade.

Neste livro, reunimos o conhecimento mais recente e relevante no campo da botânica aplicada, abrangendo uma ampla gama de tópicos, desde a fisiologia vegetal até a biotecnologia e conservação. Os estudos apresentados aqui refletem a diversidade e a complexidade das interações entre as plantas e seus ambientes, destacando a importância da botânica na promoção da sustentabilidade e no enfrentamento dos desafios ambientais contemporâneos.

Os autores, especialistas em suas respectivas áreas de pesquisa, compartilham suas descobertas e insights com uma clareza e profundidade que certamente inspirarão tanto os estudantes quanto os profissionais da botânica. Este livro é uma fonte valiosa de informação e inspiração para todos aqueles que buscam compreender e valorizar a incrível diversidade da flora e seu papel essencial na manutenção da vida no planeta.

Que esta obra sirva como um guia e uma fonte de inspiração para futuras gerações de botânicos e amantes da natureza, incentivando o contínuo avanço do conhecimento botânico e o cuidado responsável com o nosso precioso ambiente natural.

Que a jornada de descoberta e aprendizado que se inicia com a leitura deste livro possa florescer em ações concretas e impactantes em prol da botânica e da conservação da biodiversidade.

Boa Leitura
Os Organizadores

CAPÍTULO 1

MODIFICAÇÕES ANATÔMICAS EM RAÍZES DE *Elaeis guineensis* Jacq. SUBMETIDAS AO ALAGAMENTO

*MORPHOLOGICAL MODIFICATIONS OF *Elaeis guineensis* Jacq. ROOTS SUBJECTED TO FLOODING*

DOI: <https://doi.org/10.56001/24.9786500981315.01>

Submetido em: 06/03/2024

Revisado em: 20/03/2024

Publicado em: 27/03/2024

Nara Helena Tavares da Ponte

Universidade do Estado do Amapá, Colegiado Eng. Agrônômica, Macapá-AP

<http://lattes.cnpq.br/7204216882272739>

Rodolfo Inacio Nunes Santos

Universidade Federal Rural da Amazônia, Instituto Socioambiental e dos Recursos

Hídricos, Belém-PA

<http://lattes.cnpq.br/8276021041237368>

Roberto Lisboa Cunha

Embrapa Amazônia Oriental, Laboratório de Análise de Sistemas Sustentáveis,

Belém-PA

<http://lattes.cnpq.br/9210053521895301>

Marcelo Murad Magalhães

Embrapa Amazônia Oriental, Laboratório de Análise de Sistemas Sustentáveis,

Belém-PA

<http://lattes.cnpq.br/5995094571794486>

Ana Catarina Siqueira Furtado

Embrapa Amazônia Oriental, Laboratório de Botânica, Belém-PA

<http://lattes.cnpq.br/3857949988201584>

Fernanda Ilkiu Borges de Souza

Embrapa Amazônia Oriental, Laboratório de Botânica, Belém-PA

<http://lattes.cnpq.br/4210968979199688>

Hugo Alves Pinheiro

Universidade Federal Rural da Amazônia, Instituto Socioambiental e dos Recursos

Hídricos, Belém-PA

<http://lattes.cnpq.br/4768379087600737>

Resumo

Um fator limitante para o desenvolvimento e crescimento da palma de óleo são os estresses abióticos, sendo os mais importantes o déficit hídrico e o alagamento. O alagamento ocasiona diversas alterações morfofisiológicas nas plantas e a magnitude dessas alterações varia de acordo com a espécie e com a intensidade e duração do período de alagamento. Desse modo, esse trabalho tem como objetivo realizar o comparativo entre raízes de dendezeiro submetidos ao alagamento. Para a execução do experimento foram selecionadas mudas de *Elaeis guineensis* Jacq., de seis meses de idade, uniformes em altura e número de folhas foram selecionadas em viveiro. As mudas foram aclimatadas por 30 dias antes da instalação do experimento, com irrigação diária com 500 mL de água, volume este determinado para repor a água perdida por evapotranspiração e manter o substrato à capacidade de campo. Para a instalação do experimento foi necessário primeiramente induzir a formação de pneumatóforos nas plantas, o que é decorrente do estresse por alagamento. A caracterização anatômica de raízes foi realizada em plantas dos tratamentos controle, plantas alagadas com pneumatóforos e sem pneumatóforos, preparadas em fixadores e submetidas microscopia de eletrônica de varredura para visualização das estruturas. Os dados anatômicos das raízes mostram que plantas submetidas ao alagamento tanto com e sem pneumatóforos são menos desenvolvidas, em comparação a plantas controle.

Palavras-Chave: alagamento, anatomia, raiz, dendê.

Abstract

A limiting factor for the development and growth of oil palm is abiotic stresses, the most important of which are water deficit and waterlogging. Flooding causes several morphophysiological changes in plants and the magnitude of these changes varies according to the species and the intensity and duration of the flooding period. Thus, this work aims to make a comparison between oil palm roots subjected to flooding. For the execution of the experiment, seedlings of *Elaeis guineensis* Jacq., six months old, were selected, uniform in height and number of leaves were selected in a nursery. The seedlings were acclimatized for 30 days before the installation of the experiment, with daily irrigation with 500 mL of water, a volume determined to replace the water lost by evapotranspiration and maintain the substrate at field capacity. In order to set up the experiment, it was first necessary to induce the formation of pneumatophores in plants, which is due to flood stress. The anatomical characterization of roots was performed on plants of the control treatments, plants flooded with pneumatophores and without pneumatophores, prepared in fixators and submitted to verredura electron microscopy for visualization of the structures. Root anatomical data show that plants subjected to flooding with and without pneumatophores are less developed compared to control plants.

Keywords: Flooding, Anatomy, Root, Oil Palm.

Introdução

A palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) é uma palmeira de origem africana cujos frutos podem ser extraídos o óleo de palma (da polpa), utilizado para produção do azeite

de dendê e na fabricação de margarinas, maioneses, sabões e detergentes (MULLER, 1980); e o óleo de palmiste (da amêndoa) que, além de ser usado na indústria alimentícia, é também usado na produção de biodiesel e na indústria química (DORS, 2011).

Um fator limitante para o desenvolvimento e crescimento da palma de óleo são os estresses abióticos, sendo os mais importantes o déficit hídrico e o alagamento (BANSAL; SRIVASTAVA, 2015). Este último ocasionado principalmente por práticas de irrigação inadequadas, fatores antrópicos indiretos e consequências naturais (meteorológicas) (BANSAL; SRIVASTAVA, 2015). O alagamento ocasiona diversas alterações morfofisiológicas nas plantas e a magnitude dessas alterações varia de acordo com a espécie e com a intensidade e duração do período de alagamento (BAILEY-SERRES; COLMER, 2014).

Dentre as alterações na morfologia, as plantas podem desenvolver aerênquimas nos órgãos submersos e pneumatóforos que crescem acima da lâmina hídrica, dentre outros (FAHN, 1982). Estruturas como lenticelas hipertróficas foram observadas em raízes adventícias de *Hura crepitans* e *Tabebuia aurea* (MARTINEZ *et al.*, 2011; OLIVEIRA *et al.*, 2017), uma maior porosidade foi observada nos tecidos de raízes de *Copernicia prunifera* (ARRUDA; CALBO, 2004) e a ocorrência de pneumatóforos foi evidenciada em plantas de Buriti (*Mauritia vinifera*) e palma de óleo (*E. guineensis*) (PEREIRA *et al.*, 2000; RIVERA-MENDES *et al.*, 2016).

Desse modo, esse trabalho tem como objetivo realizar uma análise morfológica de raízes de dendezeiro submetidos ao alagamento.

Metodologia

• Material vegetal e condições de crescimento

Mudas de *Elaeis guineensis* Jacq., de seis meses de idade, uniformes em altura (~ 30 cm) e número de folhas (~ 10 folhas) foram selecionadas em viveiro (1° 58' 42" S, 48° 36' 50" W, Moju-PA, Brasil) e transportadas para casa de vegetação (Embrapa Amazônia Oriental, Belém-PA, Brasil, 1° 27' 21" S, 48°30'14" W). As mudas foram aclimatadas por 30 dias antes da instalação do experimento, com irrigação diária com 500 mL de água, volume este determinado para repor a água perdida por evapotranspiração e manter o substrato à capacidade de campo.

Para a instalação do experimento foi necessário primeiramente induzir a formação de pneumatóforos nas plantas, o que é decorrente do estresse por alagamento. Então, 150

mudas foram submetidas ao estresse por alagamento (RIVERA-MENDES *et al.*, 2016), induzido por meio da submersão das plantas em água, realizada em vasos de polietileno de 15 L (30 × 30 cm, altura vs. diâmetro). O volume de água utilizado nos vasos foi suficiente para manter uma lâmina de 2 cm de água acima da superfície do solo. A água evaporada foi diariamente repostada a fim de preservar a lâmina hídrica e manter as plantas continuamente alagadas. Outras 50 mudas foram mantidas sob irrigação diária à capacidade campo conforme descrito anteriormente. Após 77 dias de cultivo nessas condições, as plantas sob alagamento apresentaram um número bastante variável de pneumatóforos lançados acima da superfície da lâmina de água, enquanto as plantas irrigadas à capacidade de campo não apresentaram pneumatóforos.

- **Caracterização anatômica das raízes**

A caracterização anatômica de raízes foi realizada em plantas dos tratamentos controle, plantas alagadas com pneumatóforos e sem pneumatóforos. As raízes coletadas foram cortadas em tamanhos de 10, 5 e 3 cm e imediatamente fixadas em FAA 50% (Formol, Álcool e Ác. Acético) e FNT (Formalina Neutra Tamponada), onde foram mantidas por 7, 5 e 2 dias até troca para álcool etílico 70%, para conservação (Demarco, 2012). Posteriormente, as amostras foram seccionadas no tamanho máximo de 0,5 cm de altura e selecionados aleatoriamente para serem desidratados em bateria alcoólica de 70%-100%, por um período de 1:30 horas, por tratamento. Parte das amostras foram submetidas ao procedimento de ponto crítico para posterior metalização em ouro para observação em microscópio eletrônico de varredura (MEV) (POTIGUARA *et al.*, 2013).

As amostras que não passaram por esse estágio de ponto crítico, foram secas ao ar e submetidas diretamente à metalização. As raízes foram seccionadas no plano transversal, de forma que na mesma imagem pudessem ser selecionados 30 pontos uniformemente distribuídos entre 4 tecidos das raízes: aerênquima, endoderme, xilema e floema. As condições de operação para imageamento em elétrons secundários foram: corrente do feixe de elétrons = 90 μ A, voltagem de aceleração constante = 10 kv, distância de trabalho = 15 mm.

Resultados e Discussão

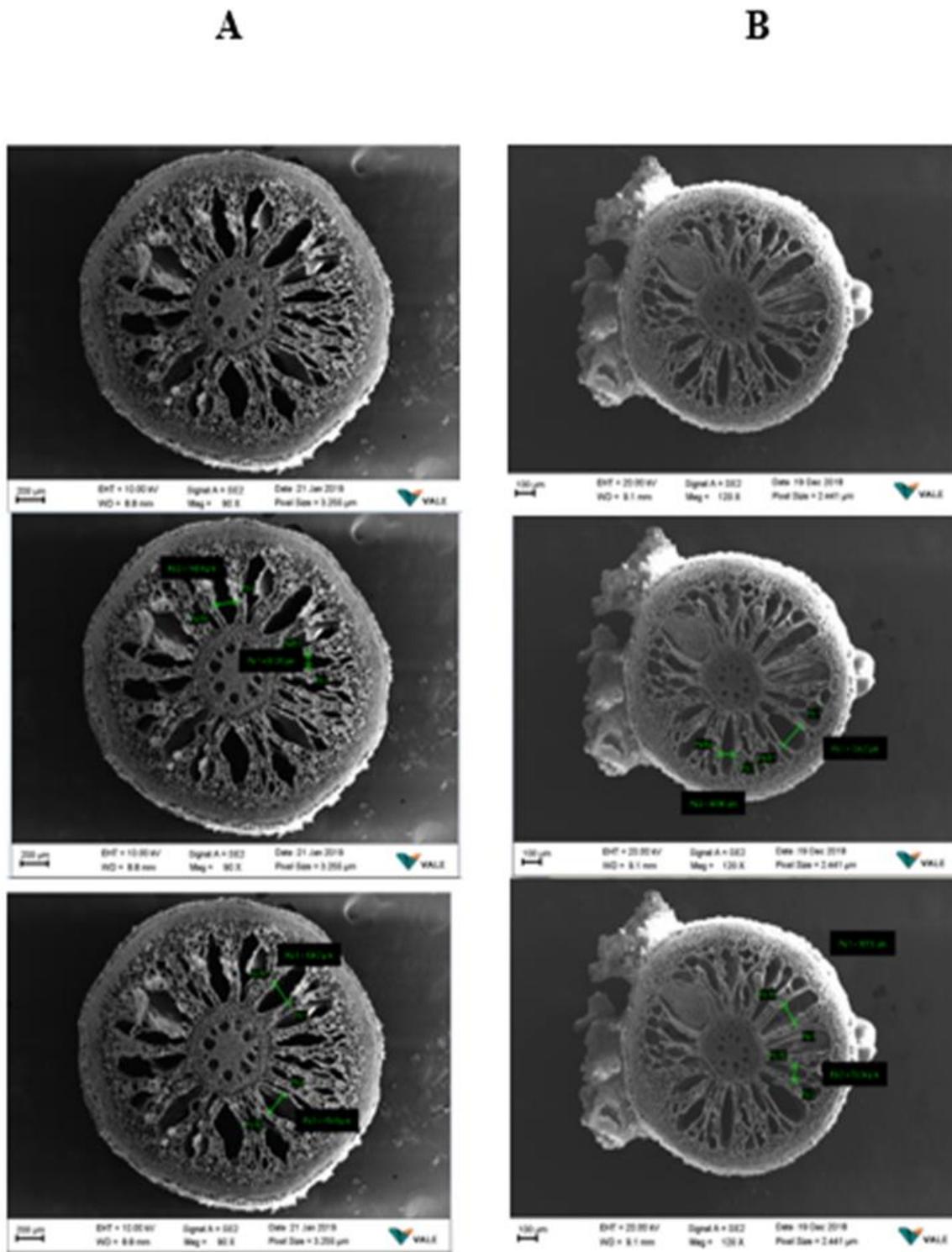
- **Caracterização anatômica das raízes**

Nas raízes normais nas condições de capacidade de campo das plantas controle a rizoderme encontra-se presente (Fig. 2A). Tanto exoderme quanto córtex periférico apresentam camadas consideráveis de células e são de fácil delimitação, ambos os tecidos são formados por células de pequeno tamanho, porém às do córtex são moderadamente maiores. O córtex interno é formado inicialmente por 4 a 6 camadas de células de grande tamanho, seguido por uma região de aerênquimas bem desenvolvidos. O feixe vascular apresenta metaxilemas robustos e medula significativa.

Nas raízes alagadas sem pneumatóforos (Fig. 2B), a rizoderme está presente e, de forma semelhante às raízes com pneumatóforos, a distinção entre exoderme e córtex periférico é pouco distinta, além de possuir poucas camadas iniciais de córtex interno. As características do feixe vascular também são semelhantes as das raízes com pneumatóforos.

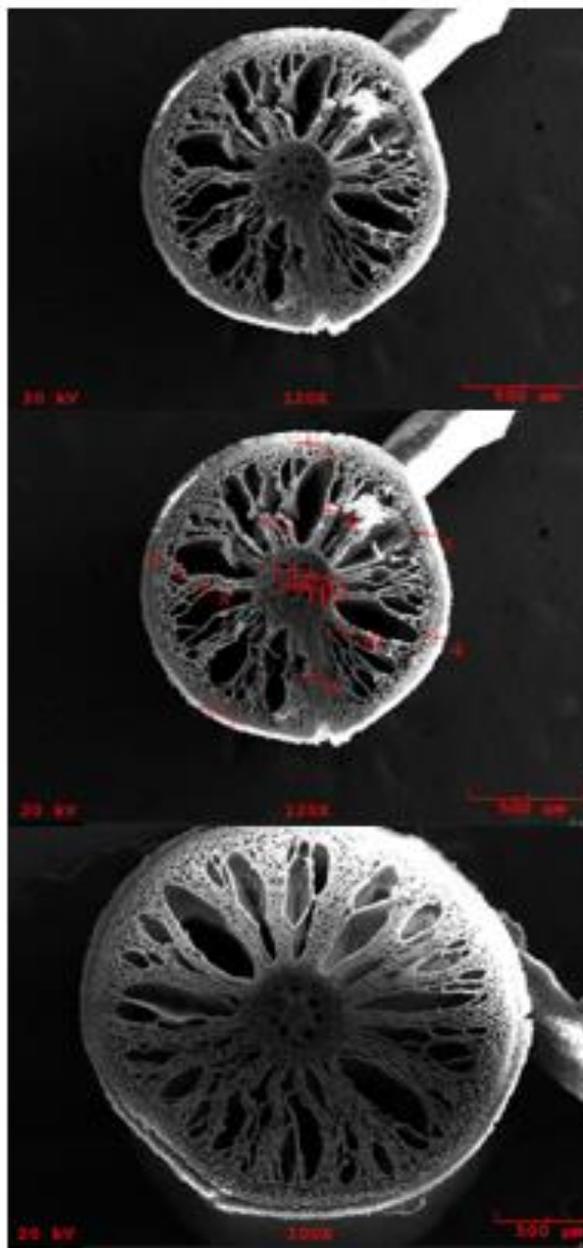
Semelhantemente nas raízes alagadas com pneumatóforos (Fig. 2C) a rizoderme se encontra aderida à raiz e a exoderme se caracteriza por poucas camadas de células de pequeno diâmetro; o córtex periférico é bastante reduzido, sendo difícil distingui-lo da exoderme, porém o primeiro apresenta células com diâmetro ligeiramente maior; o córtex interno é menor em relação a raiz normal, assim os aerênquimas ocupam uma área maior do corte transversal. O feixe vascular possui menor diâmetro, seus metaxilemas são menos significativos e sua medula reduzida.

Figura 1: Plantas controle (A) plantas alagadas sem pneumatóforos (B) plantas alagadas com pneumatóforos (C).



Fonte: Autores, 2024.

C



Fonte: Autores,2024.

Os **pneumatóforos** são raízes especializadas com geotropismo negativa que cresce fora da superfície da água. Essas raízes têm estruturas semelhantes aos poros ou lenticelas, cuja função é fornecer ar para as raízes típicas de locais pantanosos e alagados. Espécies *hidrofíticas* como os manguezais possuem pneumatóforos (*Avicennia germinans* e *Laguncularia racemosa*), (*Taxodium distichum*) e (*Nyssa aquatica*). Esse de tipo de raiz se desenvolve em algumas espécies de plantas que crescem em solos

saturados com água e fortemente compactados. As raízes epigeais têm muitos poros e tecidos esponjosos, o que facilita as trocas gasosas com a atmosfera circundante. Áreas inundadas são ambientes anaeróbicos; portanto, as plantas devem se adaptar a essas condições adversas. Nesse caso, os pneumatóforos possuem amplos espaços intercelulares que facilitam a difusão de gases para as raízes submersas (Thomas *et al.*, 2018).

Pneumatóforos são estruturas semelhantes às lenticelas presentes nas raízes de algumas espécies vegetais (HENDERSON, 1990; GEISSLER *et al.*, 2002). No dendê os pneumatóforos se caracterizam por cortes na rizoderme e na hipoderme que permitem a exposição do tecido cortical ao ar (JOURDAN; REY, 1924).

Em geral, a redução no crescimento das raízes é o principal efeito negativo do estresse por alagamento. Isto se deve a menor oxigenação dos tecidos, o que ocasiona um aumento na respiração anaeróbica (KREUZWIESER; RENNENBERG, 2014).

Considerações Finais

Os dados anatômicos das raízes mostram que plantas submetidas ao alagamento tanto com e sem pneumatóforos são menos desenvolvidas, em comparação a plantas controle.

Referências

ARRUDA, G. M. T., CALBO, M. E. R. Efeitos da inundação no crescimento, trocas gasosas e porosidade radicular da carnaúba (*Copernicia prunifera* (Mill.) H.E. Moore) **Acta Botanica Brasilica**, 18(2): 219-224. 2004.

BAILEY-SERRES, J. COLMER, T. D. Plant tolerance of flooding stress – recent advances, **Plant, Cell and Environment** , n. 37, p.2211–2215, 2014.

BANSAL, R., SRIVASTAVA, J. P. Effect of Waterlogging on Photosynthetic and Biochemical Parameters in Pigeonpea, **Russian Journal of Plant Physiology**, Vol. 62, No. 3, pp. 322–327, 2015.

DORS, G. **Etanólise enzimática do óleo de palma visando a produção de biodiesel em sistema contínuo**. 2011. 233 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. Disponível em: acesso em: 12.06.2019.

FAHN, A. **Plant anatomy**. Pergamon International Library. New York. 1982.

GEISSLER, N.; SCHNETTER, R.; SCHNETTER, M.-L. 2002. The pneumatophodes of *Laguncularia racemosa*: Little known rootlets of surprising structure, and notes on a new fluorescent dye for lipophilic substances. **Plant Biology**, v. 4, 06: 729-739.

HENDERSON, A. 1990. Arecaceae. Part I. Introduction and the Iriarteinae. **Flora Neotropica**, 1-100.

JOURDAN, C.; REY, H. 1997. Architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system, **Plant and soil**, v. 189, n. 1:33-48.

KREUZWIESER, J.; RENNENBERG, H. 2014. Molecular and physiological responses of trees to waterlogging stress. **Plant cell environ**, v.37: 2245-2259.

MARTINEZ, G. B., MOURÃO, M., BRIENZA JUNIOR, S. Respostas morfofisiológicas de plantas de açacu (*Hura crepitans* L.) provenientes de várzeas do rio Amazonas: efeito da anoxia do solo, **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.35, n.6, p.1155-1164, 2011.

MULLER, A. A. **A cultura do dendê**. Belém, Embrapa-CPATU, 1980.

OLIVEIRA, A. K. M. de., GUALTIERIS, C. J. Trocas gasosas e grau de Tolerância ao estresse hídrico induzido em plantas jovens de *Tabebuia aurea* (paraTudo) submetidas a alagamento, **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 181-191, jan.-mar., 2017.

PEREIRA, L. A. R., CALBO, M. E. R.; FERREIRA, C. J. Anatomy of Pneumatophore of *Mauritia vinifera* Mart. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, vol.43, no.3 Curitiba, 2000.

POTIGUARA, R. C. V.; SILVA, R. J. F.; KIKUCHI, T. Y. S.; LUCAS, F. C. A.; MACEDO, E. G. 2013. (Org.). **Estruturas vegetais em microscopia eletrônica de varredura**. Belém, PA: Museu Paraense Emílio Goeldi: Universidade do Estado do Pará, 2013, 116.

RIVERA-MENDES, Y. D. R., CUENCA, J. C., ROMERO, H. M. Physiological responses of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) seedlings under different water soil conditions. **Agronomia Colombiana**, 34(2), 163-171, 2016.

THOMAS, E. H., WEBER W. M. *et al.*, 2018. Pneumatophores: Estrutura e crescimento de árvores. Disponível em: Pneumóforos: características, tipos e função - Maestrovirtuale.com acessado em 16/05/2023.

CAPÍTULO 2

HOMEOPATIA NA AGRICULTURA

HOMEOPATHY IN AGRICULTURE

DOI: <https://doi.org/10.56001/24.9786500981315.02>

Submetido em: 27/09/2024

Revisado em: 28/10/2024

Publicado em: 05/11/2024

Magna Maria Macedo Nunes Costa

Embrapa Algodão

Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas, Campina Grande-PB

<http://lattes.cnpq.br/5347094641181559>

Resumo

A agricultura moderna deve atender às necessidades de mudança da sociedade em termos de qualidade dos alimentos e em relação às questões ambientais (biodiversidade, habitats, qualidade da água, qualidade do ar e mudança climática). Nesse contexto, soluções do tipo ganha-ganha ao nível de propriedade rural são requeridas, com mais sustentabilidade na produção de alimentos bem como na redução da poluição do ar, da água e do solo e na perda da biodiversidade e dos recursos naturais. Para abordar essas questões, uma nova disciplina chamada “agro-homeopatia sistêmica” está emergindo e, atualmente, sendo desenvolvida. Essa abordagem considera as plantas e suas interações com o ambiente como um ecossistema unificado chamado de “hólon”, e está baseada no uso de substâncias ultra diluídas que são seguras para os produtores rurais e não têm efeitos ecológicos colaterais. Este capítulo descreve os princípios e a aplicação dessa abordagem.

Palavras-chave: agro-homeopatia sistêmica; agroecossistemas; hólon; metabólitos secundários; similaridade metabólica

Abstract:

Modern agriculture must meet the changing needs of society in terms of food quality and in relation to environmental issues (biodiversity, habitats, water quality, air quality and climate change). In this context, win-win solutions at farm level are required, with more sustainable food production as well as reduction of air, water and soil pollution and loss of biodiversity and natural resources. To address these issues, a new discipline called “systemic agrohomeopathy” is emerging and currently being developed. This approach considers plants and their interactions with the environment as a unified ecosystem called a “holon”, and is based on the use of ultra-diluted substances that are safe for farmers and have no ecological side effects. This chapter describes the principles and application of this approach.

Keywords: systemic agrohomeopathy; agroecosystems; holon; secondary metabolites; metabolic similarity

Introdução

Homeopatia na Agricultura

De acordo com os quatro princípios da agricultura orgânica, saúde, ecologia, cuidado e justiça, as substâncias que são usadas para o cuidado e a nutrição de plantas, e para a proteção contra pragas, devem ser seguras para as pessoas, os animais e o ambiente. Esses princípios estão focados em sustentar e melhorar a saúde do solo, das plantas, dos seres humanos e dos animais; respeitar os sistemas ecológicos e proteger os recursos naturais do planeta para a atual e as futuras gerações. Nesse contexto, a agro-homeopatia pode ser uma abordagem integrativa para melhorar a agricultura orgânica, uma vez que os tratamentos homeopáticos, devido à sua diluição ultra-alta, têm pouco ou nenhum efeito ecológico colateral. Nos últimos anos, tem havido um interesse crescente da comunidade científica nesses métodos e muitos estudos científicos têm sido feitos para avaliar o efeito de tratamentos homeopáticos sobre as plantas. Diversos sistemas de plantio foram criados tanto na pesquisa básica (modelos de germinação e crescimento “*in vitro*”) quanto na aplicada (experimentos de campo). Pesquisas experimentais em plantas saudáveis e estressadas têm mostrado o potencial de tratamentos homeopáticos para influenciar as plantas através do aumento nas variáveis de crescimento, na taxa de germinação e nas substâncias de defesa, e fortalecimento das plantas contra os ataques de pragas e doenças.

A homeopatia é um método clínico-terapêutico desenvolvido em 1796 por Samuel Hahnemann (1755-1843) e depende de três princípios: a similaridade, a individualização dos casos e o infinitesimal. Em particular, o *princípio da similaridade* (tratar semelhantes por semelhantes) é geralmente considerado um dos pilares da homeopatia e afirma que um paciente deve ser tratado com uma substância que, na pessoa saudável, cause sintomas similares àqueles apresentados por uma pessoa infectada.

O método homeopático foi desenvolvido e formulado primeiramente para humanos e não para plantas, e sua aplicação na agricultura só pode ter sucesso após consideradas as diferenças entre plantas e animais. A tentativa de aplicar o tratamento homeopático designado para humanos em sistemas vegetais, sem nenhum tipo de adaptação, inevitavelmente falha. Por outro lado, os princípios de Hahnemann são universais e podem ser aplicados a muitos sistemas biológicos, incluindo aqueles do reino vegetal, mas a seleção do remédio certo para a cura das plantas baseada na *Materia*

Medica é, provavelmente, uma abordagem incorreta. Podemos identificar ao menos duas razões lógicas principais que suportam essa conclusão. A primeira é a evidência de que as plantas exibem muitas diferenças morfológicas e bioquímicas quando comparadas aos humanos e aos outros animais. Na Tabela 1, são apresentadas as principais diferenças entre células vegetais e animais.

Tabela 1 – As principais diferenças morfológicas e bioquímicas entre células vegetais e animais.

Características	Célula vegetal	Célula animal
Forma da célula	Geralmente em formato quadrado ou retangular	Regular e redondo
Parede celular	Presente	Ausente
Núcleo	Localizado em um lado da célula	Localizado no centro da célula
Lisossomos	Presente, mas muito raro	Presente
Centrossomos	Ausente	Presente
Plastídeos	Presente	Ausente
Vacúolos	Grande e posicionado centralmente	Usualmente pequenos e numerosos
Mitocôndrias	Presente, em menor número nos tecidos verdes, insensível ao cianeto	Presente, numerosos, suscetível ao cianeto
Nutrientes essenciais	Aminoácidos, vitaminas e coenzimas sintetizados	Aminoácidos, vitaminas e coenzimas não sintetizados
Metabolismo secundário	Presente	Ausente

A segunda razão lógica é a evidência de que os mecanismos de defesa das plantas são diferentes daqueles dos animais. Nas plantas, um dos mecanismos de defesa mais comum é a necrose (um tipo de apoptose programada), onde o patógeno fica preso em tecidos “mortos”. A planta sacrifica uma parte dos seus tecidos para prevenir a disseminação do patógeno. Também, um outro mecanismo de defesa comum nas plantas é a produção de metabólitos secundários para a intoxicação do patógeno. Nos animais, os mecanismos de defesa estão baseados em tecidos especializados (linfonodos, timo, baço), células especializadas (linfócitos, macrófagos) e compostos proteicos específicos (imunoglobulinas). Finalmente, os receptores e as vias de sinalização das células vegetais, envolvidos no reconhecimento de microrganismos patogênicos, são diferentes daqueles em células animais.

Um Novo Paradigma para a Agro-Homeopatia: a Teoria do Hólon

Uma das principais dificuldades em se usar tratamentos altamente diluídos é a escolha do remédio bem como a escala de diluição. É importante considerar quem em fitopatologia não há equivalência à *Materia Medica* homeopática humana. Daí a escolha do remédio homeopático representa a maior dificuldade. A escolha dos tratamentos tem sido baseada, até agora, em uma abordagem antropocêntrica, onde a planta é considerada similar ao humano, e os sintomas patológicos das plantas são considerados, de certa forma, similares àqueles dos humanos. Esse método não é completamente confiável devido às diferenças acima mencionadas entre plantas e animais. Dessa forma, a solução para a problemática envolve a aplicação de tratamentos agro-homeopáticos não de acordo com uma metodologia homeopática antropocêntrica, mas com uma abordagem agroecológica sistêmica.

Nessa abordagem, a propriedade é considerada um agroecossistema, isto é, um sistema complexo não linear capaz de auto-regulação. Essa ideia foi primeiramente desenvolvida por Tichavský em 2008, o qual cunhou o termo “holo-homeopatia” para designar a homeopatia aplicada às plantas, mas com uma abordagem sistêmica, em vez de visões sintomáticas dos problemas agrônômicos. Refere-se ao conceito de “hólon”, cunhado por Arthur Koestler em 1967, descrito como um sistema complexo que tem individualidade, é composto de sub-sistemas e é simultaneamente parte de um sistema de ordem superior. O hólon tem características distintas e segue comportamentos típicos. É uma estrutura dissipativa auto-organizada em evolução, composta de hólons menores chamados de sub-hólons, cujas estruturas existem num balanço entre o caos e a ordem; é uma unidade auto-suficiente com um grau de independência ou autonomia capaz de suportar perturbações. Também tem estabilidade. É dinâmico e tem um alto grau de sinergia e colaboração, de modo que seus diferentes componentes são altamente conectados. Alguma mudança que ocorra em uma das suas partes afeta as outras partes, e ele desempenha todas as funções necessárias para sua adaptação e sobrevivência. O hólon é similar a um sistema complexo, mas tem uma diferença importante – se uma parte de importância não-vital é desconectada em um sistema complexo, ele continuará a funcionar sem alterações, ao mesmo tempo que, se uma parte do hólon for modificada, sua totalidade será alterada. Adicionalmente, diferentemente dos sistemas complexos, todas as partes do hólon contêm informação completa, tendo, portanto, características

fractais. Um sistema complexo não é necessariamente fractal, ao passo que o hólón, por definição, tem uma estrutura e uma dinâmica baseada em um alto grau de fractabilidade.

Nesse contexto, a propriedade agrícola pode ser considerada um sistema agroecológico aberto ou agroecossistema, que pode ser incorporada no conceito de hólón. Em particular, o agroecossistema pode ser identificado tanto como um hólón, no caso de uma propriedade muito grande (acima de 1.000 ha), isolada da paisagem circundante por alguma razão geográfica, quanto por um sub-hólón (uma parte de um hólón, expressando todas as características de um hólón, mas numa escala menor), no caso de uma propriedade pequena (menor do que 20 ha) localizada próxima a lagos e florestas. As questões definitivas para problemas particulares devem sempre ser buscadas dentro do hólón. Em alguns casos, pode haver uma sobreposição perfeita entre o agroecossistema e o hólón, enquanto que, em outros casos, o agroecossistema pode simplesmente ser uma parte do hólón. Em tais agroecossistemas (“hólón” ou “sub-hólons”), uma rede de interações entre os organismos está envolvida. Desde a colonização da Terra por linhagens ancestrais de plantas há 450 milhões de anos atrás, estes organismos e seus micróbios associados têm se interagido formando uma entidade funcional chamada de “holobionte”, que é um conjunto de espécies onde ocorre seleção natural entre hospedeiros e micróbios, e também entre os micróbios em si. O produtor, através de práticas agrícolas, intervém no agroecossistema e é parte integrante dele. Todas as interações de um agroecossistema se convergem em uma rede. A abordagem homeopática sistêmica considera todas as possíveis interações entre os organismos que vivem em um agroecossistema. Por conveniência, o termo agroecossistema será usado no texto subsequente.

A abordagem agro-homeopática sistêmica também permite a identificação do “biótipo” e do “nível de patogênese” do agroecossistema. A identificação dessas duas características é feita seguindo a metodologia homeopática de Hahnemannian, e tem como objetivo avaliar o estado nutricional das plantas ou do agroecossistema. Um biótipo ou constituição homeopática é uma associação de características morfológicas, fisiológicas e psicológicas de cada sujeito devido à interação entre a herança genética e as condições ambientais na qual ele vive, a qual faz dele único. Para as plantas, o biótipo ou a constituição depende de diferentes fatores, tais como o genótipo e o fenótipo, o ambiente e as condições nutricionais, a relação com outras plantas e animais, o estágio fenológico, os tipos de reprodução e os fatores epigenéticos. Os biótipos não estão relacionados de uma maneira fixa com uma família, uma espécie ou um híbrido de planta,

mas exibem modelos individuais de plasticidade comportamental e morfológica, mesmo quando as plantas são clonadas. O modelo de biotipologia homeopática mais adequado para as condições específicas das plantas é o modelo humano de Antoine Nebel (1870–1954), modificado pelo homeopata brasileiro Roberto Costa. As plantas apresentam cinco biótipos individuais ou constituições básicas: sulfúrico, carbônico, fosfórico, fluórico e silícico, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Os cinco biótipos de plantas, as substâncias correspondentes e sua fórmula química.

Biotipo/Constituição	Substância	Fórmula química
Sulfúrico	<i>Sulphur</i>	S
Carbônico	<i>Calcarea carbonica</i>	CaCO ₃
Fosfórico	<i>Calcarea phosphorica</i>	CaHPO ₄
Fluórico	<i>Calcarea fluorica</i>	CaF ₂
Silícico	<i>Calcarea silica</i>	CaSi ₂ O ₅

A identificação de biótipos está baseada na teoria da predominância de componentes minerais proposta por Nebel. Baseada em certas características e na falta ou na presença excessiva de componentes minerais específicos, é possível distinguir todos os biótipos. Por exemplo, o biótipo Sulfúrico é bioquimicamente caracterizado pelo excelente manejo do enxofre. Do ponto de vista macroscópico, esse biótipo é o normótipo por excelência. O desenvolvimento vegetativo é regular e balanceado. A planta é harmônica e simétrica das raízes à parte aérea; responde prontamente a estresses climáticos e nutricionais. Adicionalmente, é altamente adaptada ao ambiente no qual vive. Esse biótipo é, portanto, balanceado em todas as suas proporções e forma, e é também completamente robusto. A identificação do biótipo permite a determinação de somente uma parte de uma substância mineral necessária para as plantas ou o agroecossistema. Essas informações devem ser integradas com a identificação do nível de patogênese no agroecossistema para encontrar o sal específico a ser aplicado. Na homeopatia humana, o nível de patogênese se refere ao conjunto de sintomas patológicos específicos apresentados por indivíduos saudáveis após a administração de uma certa substância. Esse conceito pode ser transferido para a agro-homeopatia; todas as substâncias capazes de alterar a saúde do agroecossistema produzem um “quadro patogênico” de sintomas específicos. Um agroecossistema pode apresentar seis níveis de patogênese (Tabela 3).

Estes níveis, determinados por Tichavsky em 2009, foram derivados de um esquema proposto por Nebel.

Tabela 3 – Os diferentes níveis de patogênese, as substâncias correspondentes e seus cátions.

Nível de patogênese	Substância	Cátion
1- Nível cálcio	<i>Calcarea carbônica</i>	$(\text{CO}_3\text{H}) \rightarrow (\text{Ca})^+$
2- Nível magnésio	<i>Magnesia carbonica</i>	$(\text{CO}_3\text{H}) \rightarrow (\text{Mg})^+$
3- Nível potássio	<i>Kalium carbonicum</i>	$(\text{CO}_3\text{H}) \rightarrow (\text{K})^+$
4- Nível sódio	<i>Natrum carbonicum</i>	$(\text{CO}_3\text{H}) \rightarrow (\text{Na})^+$
5- Nível barítico	<i>Baryta carbonica</i>	$(\text{CO}_3\text{H}) \rightarrow (\text{Ba})^+$
6- Nível amônia	<i>Amonium carbonicum</i>	$(\text{CO}_3\text{H}) \rightarrow (\text{NH}_4)^+$

Os diferentes quadros patogênicos apresentam uma multiplicidade de sintomas, os quais estão relacionados ao excesso ou à deficiência dos elementos químicos que caracterizam o nível patogênico. Para cada nível, há sintomas e bioindicadores específicos. Por exemplo, o nível patogênico amônia é causado por excesso ou deficiência de nitrogênio. As plantas que estão nesse nível são caracterizadas por excesso de vigor e têm muitos tecidos moles. Adicionalmente, elas reagem lentamente e têm dificuldades de adaptação. Além do mais, o nível amônia é caracterizado pela presença de insetos com aparelho bucal mastigador e sugador, plantas daninhas nitrofilicas e patologias causadas por bactérias e fungos que afetam tanto as raízes como a parte aérea. As plantas, nos seus diferentes níveis de patogênese, podem ser diferenciadas pelos sintomas nas raízes, nos caules e nas folhas (excesso ou falta de elementos minerais), e por sua resiliência ao estresse ambiental. A combinação do biótipo com o nível patogênico, por seguir os princípios da metodologia homeopática de Hahnemannian, permite a identificação do remédio agro-homeopático “mineral” que pode restaurar as condições metabólicas e nutricionais ideais da planta individual e do agroecossistema inteiro. Esse procedimento, isto é, a aplicação dos biótipos humanos e dos níveis de patogênese ao reino vegetal, é possível, porque envolve o metabolismo primário vegetal, que é similar àqueles dos animais. O metabolismo primário das plantas, ou o nível celular, está envolvido no crescimento, no desenvolvimento e na reprodução normais. Os metabólitos primários incluem: açúcares, proteínas, lipídeos, aminoácidos, ácidos orgânicos, nucleotídeos, nucleosídeos e sais minerais. Geralmente desempenham funções fisiológicas no organismo (ou seja, uma função intrínseca). A Tabela 4 mostra as possíveis combinações

entre o biótipo e o nível de patogênese, com 30 tratamentos homeopáticos aplicados em caso de desbalanceamento no metabolismo primário ou ao nível celular das plantas. Estes remédios são usados em escala de diluição centesimal (cH), e o nível de diluição/dinamização varia de 6 a 30 cH; no entanto, a potência mais frequentemente usada varia de 6 a 12 cH.

Tabela 4 - Os tratamentos homeopáticos derivados das combinações entre o biótipo e o nível de patogênese.

Nível de patogênese	Biótipo/Constituição e substâncias homeopáticas				
1- Nível cálcio	<i>Calcarea sulphurica</i>	<i>Calcarea carbonica</i>	<i>Calcarea phosphorica</i>	<i>Calcarea fluorica</i>	<i>Calcarea silica</i>
2- Nível magnésio	<i>Magnesia sulphurica</i>	<i>Magnesia carbonica</i>	<i>Magnesia phosphorica</i>	<i>Magnesia fluorica</i>	<i>Magnesia silica</i>
3- Nível potássio	<i>Kalium sulphurica</i>	<i>Kalium carbonica</i>	<i>Kalium phosphorica</i>	<i>Kalium fluorica</i>	<i>Kalium silica</i>
4- Nível sódio	<i>Natrum sulphurica</i>	<i>Natrum carbonica</i>	<i>Natrum phosphorica</i>	<i>Natrum fluorica</i>	<i>Natrum silica</i>
5- Nível barítico	<i>Baryta sulphurica</i>	<i>Baryta carbonica</i>	<i>Baryta phosphorica</i>	<i>Baryta fluorica</i>	<i>Baryta silica</i>
6- Nível amônia	<i>Amonium sulphurica</i>	<i>Amonium carbonica</i>	<i>Amonium phosphorica</i>	<i>Amonium fluorica</i>	<i>Amonium silica</i>

Outro aspecto importante dos remédios agro-homeopáticos é que eles não substituem o uso de fertilizantes minerais de origem vegetal no agroecossistema. O tratamento homeopático dá um forte sinal, mas temporário, para restaurar as deficiências minerais do sistema e melhorar a absorção e o metabolismo mineral das plantas, bem como a qualidade do solo. Subsequentemente, os proprietários implementam as técnicas agronômicas corretas.

Do Princípio de Similaridade à Similaridade Metabólica

De acordo com os princípios da homeopatia, as doenças de plantas são consideradas como desbalanceamentos (sintomas) a serem inseridos em um quadro patológico mais amplo que abranja a propriedade inteira. O método agro-homeopático sistêmico proposto aqui tem o objetivo de identificar e tratar a causa do desbalanceamento, tentando, assim, retornar o sistema ao seu estado homeostático. Nessa abordagem, a primeira fase envolve uma análise qualitativa-quantitativa cuidadosa do agroecossistema, usando ferramentas (tais como a análise de Voronai, a análise do tamanho das partículas, a refractometria) que ajudem na avaliação dos parâmetros,

incluindo biodiversidade, vitalidade do solo, biodisponibilidade de substâncias minerais e grau de resiliência do sistema como um todo. Baseado nos resultados da primeira fase preliminar (ou análise geral do agroecossistema), as preparações homeopáticas a serem aplicadas no campo são então selecionadas. No caso de estresse abiótico que causa desbalanceamento nutricional, o procedimento consiste na identificação de um tratamento agro-homeopático mineral de acordo com o biótipo e o nível de patogênese, como discutido acima; enquanto que, para doenças causadas por estresses bióticos (fungos, bactérias ou vírus) e para controle de pragas, a aplicação do clássico princípio da similaridade de Hahnemann, não funciona, e as diferenças entre plantas e animais têm que ser consideradas, caso contrário, há um alto risco de banalização do método e da aplicação falhar. Desta forma, o princípio da similaridade tem que ser acompanhado pelo conceito de “similaridade metabólica”. Este novo conceito está baseado na presença de substâncias chamadas metabólitos secundários nas plantas e nos animais, e foi desenvolvido por Tichavsky em 2008, baseado na evidência científica publicada na base de dados de Duke, nos Estados Unidos. As plantas produzem metabólitos primários (comuns a todas as plantas) e metabólitos secundários, os quais são substâncias ativas biologicamente, específicas da espécie e organo-específicas, presentes em muito baixas concentrações. Os metabólitos secundários das plantas são diferenciados dos metabólitos primários, uma vez que o seu papel não é crucial para o crescimento, o desenvolvimento e a reprodução normais, mas eles podem fornecer proteção às plantas contra potenciais danos do ambiente; eles também estão envolvidos na comunicação inter-planta (por exemplo, nas interações alelopáticas) e podem servir como uma ferramenta de adaptação. Portanto, eles são usualmente sintetizados em plantas para funções específicas, enquanto que os metabólitos primários geralmente têm propósitos biológicos compartilhados por todas as espécies. O método de seleção proposto por Tichavsky, baseado na lei da similaridade metabólica, pode identificar, com extrema precisão, o *simillimum* homeopático ou remédio constitucional para cada espécie de planta de interesse agrícola, bem como para cada agroecossistema. A similaridade metabólica é independente do genoma do organismo e do grupo taxonômico ao qual pertence, e pode ser detectada entre duas plantas, entre plantas superiores (árvores, arbustos, ervas e samambaias) e animais, entre plantas e insetos, entre plantas e fungos. Além do mais, os metabólitos secundários não são produtos diretos da expressão do DNA (transcrição e tradução), mas têm uma forte base epigenética e, portanto, dependem fortemente das condições ambientais. Essa descoberta explica por que a intervenção homeopática sistêmica para a resolução de um

problema específico pode mudar em função do agroecossistema considerado. A similaridade metabólica está baseada na presença de metabólitos secundários que são comuns entre plantas e animais presentes no agroecossistema. De acordo com essa abordagem, certas doenças ou condições de estresse que afetam uma planta específica podem ser mitigadas através do uso de plantas ou outros organismos que têm metabólitos muito similares à planta em questão. Pela análise do agroecossistema dentro dos perímetros da propriedade, é possível identificar organismos, plantas silvestres, insetos, fungos e animais. Então, pelo uso de dados de consulta pública de Duke ou Pherobase, que facilita a pesquisa detalhada sobre plantas, substâncias químicas (metabólitos secundários), bioatividade e etnobotânica (usando nomes científicos ou comuns), é possível identificar aquelas espécies com o maior número de metabólitos em comum com a planta em questão ou com a doença a ser curada. Por isso, duas plantas que têm um maior número de metabólitos secundários em comum podem ser usadas como remédios agro-homeopáticos uma da outra. De acordo com a abordagem agro-homeopática sistêmica, o grau de interação entre dois ou mais organismos dentro do agroecossistema é baseado na similaridade metabólica, isto é, na similaridade dos metabólitos secundários entre os organismos considerados. Em uma interação hospedeiro-patógeno, o patógeno deve ter um alto nível de similaridade metabólica com o hospedeiro, de tal forma que a infecção possa ocorrer; na ausência de tal similaridade, o patógeno não está habilitado a reconhecer e atacar o hospedeiro. Por exemplo, no caso de insetos, eles devem necessariamente possuir um certo número de semioquímicos que os permitem decidir qual planta atacar. Por outro lado, as plantas atacadas devem produzir e liberar uma variedade de metabólitos secundários denominados “Compostos Orgânicos Voláteis”, melhor conhecidos como VOCs, como uma maneira de alertar outras plantas do perigo iminente. Os sinais aéreos podem se difundir e alcançar plantas não danificadas próximas, dando a elas a chance de fortalecer suas defesas. Os receptores não estão limitados a conespecíficos. Os inimigos naturais também podem detectar os sinais de alerta e localizar o lugar de emissão de VOCs.

Baseado na base de dados de Duke, as assim chamadas “tabelas metabólicas” têm sido construídas para algumas espécies de plantas, permitindo que a planta com o maior número de metabólitos em comum com a planta alvo seja encontrada mais facilmente. As tabelas metabólicas similares podem ser criadas para os metabólitos secundários compartilhados, e suas ações específicas podem ser relatadas. Usando tais tabelas, é

possível identificar, para casos agudos, a planta com o maior grau de similaridade (maior número de metabólitos secundários em comum).

Espécies metabolicamente relacionadas podem ser usadas para construir Tinturas Mães (TM) e preparações agro-homeopáticas através de um processo específico de diluição e subsequente “dinamização”, obtendo-se potências que variam de 3 cH a 12 cH, com concentrações iniciais das substâncias de < 1 ppt a 1 ppm. As preparações resultantes são, portanto, completamente de origem natural e livres de substâncias poluentes e/ou nocivas (para os operadores e o ambiente). Além disso, essas substâncias melhoram o ambiente pela exclusão do uso de substâncias químicas, bem como através do uso muito limitado de matérias-primas. Vale mencionar que a abordagem agro-homeopática sistêmica não ignora a “boa agronomia básica”, pela aplicação das melhores práticas para manter a saúde do solo e da planta (fertilização natural, rotação de culturas, adubação verde, cobertura morta, cobertura viva, insumos orgânicos e preparo conservacionista do solo). Além disso, a metodologia agro-homeopática permite o uso de materiais ou insumos vegetais, preferencialmente da propriedade ou do seu entorno. Esses materiais “autóctones” podem ser usados para preparar os remédios agro-homeopáticos utilizando os recursos internos do ecossistema e, então, reduzindo os custos e fazendo com que os produtores fiquem cada vez menos dependentes dos produtos para proteção das plantas disponíveis comercialmente.

O mecanismo de ação pelo qual os tratamentos homeopáticos agem ainda é desconhecido, mas algumas hipóteses podem ser levantadas, trazendo significância ecológica para alguns desbalanceamentos causados por estresses abióticos ou bióticos no agroecossistema em consideração. As doenças de plantas ou as plantas daninhas representam a reação do agroecossistema para restaurar o equilíbrio, em seguida a um “evento desencadeador” que causou distúrbio no seu estado anterior – a abordagem agro-homeopática sistêmica tenta identificar a causa do evento desencadeador que leva o agroecossistema a reagir à condição adversa (infecção por patógeno, infestação de pragas, proliferação de plantas daninhas). Nesse contexto, os tratamentos agro-homeopáticos sistêmicos devem agir sobre o agroecossistema inteiro, pela estimulação das suas defesas endógenas naturais, fazendo com que ele fique mais resistente aos estresses bióticos e abióticos. A homeopatia induz um aumento na resistência natural das plantas aos patógenos, possivelmente relacionado a um efeito epigenético das diluições homeopáticas. O reequilíbrio do sistema é induzido pelos tratamentos homeopáticos. Plântulas de trigo, cultivadas a partir de sementes envenenadas com uma dose sub-letal

de As_2O_3 ou não envenenadas, mostraram diferentes perfis significativos de expressão gênica após a aplicação de As_2O_3 ultra-diluído (além do limite de Avogadro) em comparação à água (controle). Ao se comparar o crescimento em água de sementes envenenadas e não envenenadas, a maioria dos genes (85%) foi regulada positivamente. Ao se cultivar sementes envenenadas na presença de As_2O_3 ultra-diluído, em vez de água destilada, uma redução maciça nos níveis de expressão gênica para valores comparáveis aos dos grupos controle foi observada para várias classes funcionais de genes. Pareceu que o tratamento de sementes envenenadas com As_2O_3 ultra-diluído induziu uma normalização da expressão gênica, aproximando-a dos níveis basais que geralmente ocorrem nas mudas controle.

Conclusões

A abordagem agro-homeopática sistêmica considera a propriedade como um único organismo, um agroecossistema com elementos vivos e não vivos que estabelecem uma densa rede de interações. Seu propósito é fortalecer e intensificar a relação entre os organismos para criar um agroecossistema mais forte e saudável. Para atingir esse objetivo, a abordagem descrita permite o controle e o manejo do processo agrícola através da aplicação de substâncias minerais altamente diluídas e dinamizadas. Elas podem restaurar o equilíbrio no agroecossistema pela estimulação da resistência natural já presente no sistema agrário. A identificação do remédio mineral correto, através dos biótipos e dos níveis de patogênese, permite agir sobre as condições crônicas do agroecossistema (desbalanceamento no metabolismo primário da planta ou ao nível celular), enquanto que a identificação do remédio homeopático vegetal/animal, baseada no princípio da similaridade metabólica, pode permitir o manejo das condições agudas (doenças fitopatológicas).

A abordagem agro-homeopática sistêmica tem sido adotada por alguns agricultores, especialmente os orgânicos. Até o momento, várias observações foram relatadas, fornecendo perspectivas positivas e encorajadoras, mas alguma experimentação científica rigorosa é necessária para validar os resultados. Se dados estatísticos de ensaios de campo confirmassem as observações feitas até agora, a abordagem agro-homeopática sistêmica poderia representar um modelo de produção agroecológica com um baixo impacto energético. Além disso, essa abordagem poderia estar alinhada com um tipo de agricultura sustentável. Nesse contexto, a agro-homeopatia sistêmica atenderia aos três pilares da sustentabilidade: (1) econômico, devido ao uso muito baixo de matérias-

primas; (2) ambiental, evitando o uso de substâncias químicas como fertilizantes e agrotóxicos; e (3) social, com a produção de alimentos saudáveis, seguros e de alta qualidade.

Referências Bibliográficas

BALAJI DEEKSHITULU, P. V. Impact of homeopathy in agriculture. **Global Journal of Energy and Environment**, v. 1, n. 2, 2019.

DI LORENZO, F.; DINELLI, G.; MAROTTI, I.; TREBBI, G. Systemic agro-Homeopathy: a new approach to agriculture. **OBM Integrative and Complementary Medicine**, v. 6, n. 3, 2021.

FAEDO, L.; VERDI, L.; RAYNS, F.; KRETZSCHMAR, A.; WRIGHT, J.; BOFF, P. The Use of homeopathy in agriculture and its plant biostimulation effect on the strawberry cropping system. **Homeopaathy**, v. 113, n. 1, p. A1-A26, 2024.

GIESEL, A.; BOFF, M. I. C.; BOFF, P. The effect of homeopathic preparations on the activity level of Acromyrmex leaf-cutting ants. *Acta Scientiarum*, v. 34, n. 4, p. 445-451, 2012.

LÖSCH, E. L.; GAIA, M. C. de M.; LONGO, C.; BRICARELLO, P. A. Effects of homeopathic preparations on phenological development and control of insects and diseases of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). **Research, Society and Development**, v. 10, n. 1, e49610111991, 2021.

MODOLON, T. A.; BOFF, P; BOFF M. I. C.; MIQUELLUTI, D. J. Homeopathic and high dilution preparations for pest management to tomato crop under organic production system. **Horticultura Brasileira**, v. 30, p. 51-57, 2012.

PRIETO MÉNDEZ, J.; PRIETO GARCÍA, F.; HERNÁNDEZ PÉREZ, A. D.; QUIJADA MORALES, L. M.; AQUINO TORRES, E.; ACEVEDO SANDOVAL, O. A. Agrohomeopathy: New tool to improve soils, crops and plant protection against various stress conditions. Review. **Horticultura Argentina**, v. 40, n. 101, p. 43-58, 2021.

SEN, S.; CHANDRA, I.; KHATUM, M. A.; CHATERJEE, S.; DAS, S. Agrohomeopathy: na emerging field of agriculture for higher crop productivity and protection of plants against various stress conditions. *International Journal of Research and Analytical Reviews (IJRAR)*, v. 5, n. 4, p. 52-56, 2018.

SILVA, G. F. da; MAPELI, M. C.; CREMON, C.; CHAMMA, L.; SILVA, G. F. da; LUPERINI, B. C. O.; PUTTI, F. F. Homeopathic solutions as a tool for the agroecological management of velvetbean caterpillar. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 66, e23220046, 2023.

SINGHANIA, P. K.; SINGHANIA, A. **Homoeopathy in agriculture**. In: RAHMANN, G; AKSOY, U (Eds.). *Proceedings of the 4th ISOFAR Scientific Conference. 'Building Organic Bridges'*, at the Organic World Congress, p. 667-670, 2014.

SUREKHA, T.; MANIPRASAD, G. Agrohomoepathy: bridging nature and agriculture for sustainable crop health. **Galore International Journal of Health Sciences and Research**, v. 8, n. 3, p. 6-11, 2023.

CAPÍTULO 3

SAZONALIDADE DO PREÇO DA SOJA GRÃO NO ESTADO DA BAHIA ENTRE OS ANOS DE 2010 E 2020

SEASONALITY OF SOYBEAN GRAIN PRICES IN THE STATE OF BAHIA BETWEEN 2010 AND 2020

DOI: <https://doi.org/10.56001/24.9786500981315.03>

Submetido em: 23/10/2024

Revisado em: 01/11/2024

Publicado em: 05/11/2024

Leone Ricardo de Carvalho Santana

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Doutorando em Ciências Agrárias,
UFRB, Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/5275047496672301>

Bruno Augusto Gama dos Santos

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Departamento de Ciências Agrárias,
UFRB, Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/5036901529397353>

Luísa Correia Oliveira

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Mestranda em Ciências Agrárias, UFRB,
Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/6974254694442761>

Sandra Selma Marques de Souza

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Doutoranda em Ciências Agrárias,
UFRB, Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/8063376631228461>

Damiana Amancio de Souza

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Mestre em Ciências Agrárias, UFRB,
Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/4924641421179266>

Luiz Edmundo Cincura de Andrade Sobrinho

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Doutorando em Ciências Agrárias,
UFRB, Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/8521549955215670>

Jamile Maria Oliveira do Nascimento Vieira

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Doutoranda em Ciências Agrárias,
UFRB, Cruz das Almas – BA

<https://lattes.cnpq.br/1921842141023873>

Raissa Homem Gonçalves

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Doutoranda em Ciências Agrárias,
UFRB, Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/3793210498543635>

Ossival Lolato Ribeiro

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Dr. Prof. Adjunto, UFRB, Cruz
das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/1497977439998897>

Emellinne Ingrid de Sousa Costa

Bolsista de Pós-Doutorado em Fitopatologia pela Embrapa Mandioca e Fruticultura -
Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/3432137040720301>

Resumo

A Soja é um dos grãos mais cultivados ao redor do mundo, e no Brasil não é diferente. Na Bahia há um aumento na produção, gerado pelo crescimento das áreas cultivadas, bem como melhoramento nas tecnologias e uso de novas variedades resistentes a pragas e doenças e, por conseguinte, pela demanda cada vez maior do mercado externo e valorização do dólar, moeda de câmbio e que dita o preço da commodity ao redor do mundo. Este estudo teve como objetivo realizar o levantamento dos valores comercializados da soja grão nos últimos dez anos (2010 - 2020), com o intuito de observar a sazonalidade de variação de valores comercializados nos estabelecimentos regionais e suas possíveis justificativas para o comportamento dos valores no período de estudo. A metodologia adotada tratou de uma pesquisa documental sobre os dados referentes ao preço da saca da soja grão comercializado na Bahia, disponibilizados pela Secretaria de Agricultura, Pecuária, Irrigação, Pesca e Aquicultura – SEAGRI, no período de janeiro de 2010 a dezembro de 2020. Os valores da série temporal dos preços diários foram obtidos no website da SEAGRI e, posteriormente, calculou-se as médias mensais e anuais, os desvios-padrões e os coeficientes de variação, para facilitar a visualização das variações reais ocorridas nos preços da soja grão no período. Os resultados da pesquisa demonstraram que nos anos iniciais, tendo como referência o recorte espacial determinado, a soja apresentou valores relativamente reduzidos, com algumas oscilações. No entanto, após o ano de 2019 o mercado dessa cultura conquistou preços que se encontram em constante crescimento, influenciado por fatores como demanda global, condições climáticas, logísticas comerciais, entre outros. Concluiu-se que embora os preços da soja tenham enfrentado flutuações ao longo

do período analisado, o setor manteve-se competitivo no mercado internacional. No entanto, a sustentabilidade e questões ambientais são preocupações crescentes que precisam ser abordadas no setor da soja.

Palavras-Chave: Cotação, Flutuações, Oscilação dos preços, Saca

Abstract

Soybeans are one of the most cultivated grains worldwide, and in Brazil, it's no different. In Bahia, there has been an increase in production driven by the expansion of cultivated areas, improvements in technology, and the use of new varieties resistant to pests and diseases. Additionally, external market demand and the appreciation of the dollar, the global exchange currency that dictates the price of commodities, have contributed to this growth. This study aimed to survey the trading values of soybean grains over the last ten years (2010-2020) to observe the seasonality in price variation within regional markets and explore possible justifications for these trends during the study period. The methodology adopted involved documentary research on data related to the price of a sack of soybean grain traded in Bahia, provided by the Secretariat of Agriculture, Livestock, Irrigation, Fisheries, and Aquaculture (SEAGRI), from January 2010 to December 2020. The daily price series data were obtained from SEAGRI's website, and the monthly and annual averages, standard deviations, and coefficients of variation were calculated to facilitate visualization of the actual variations in soybean grain prices during the period. The research results showed that, in the initial years, using the defined spatial cut, soybean prices were relatively low, with some fluctuations. However, after 2019, this crop's market reached prices that have been steadily rising, influenced by factors such as global demand, climatic conditions, and trade logistics, among others. It was concluded that although soybean prices fluctuated throughout the analyzed period, the sector remained competitive in the international market. However, sustainability and environmental issues are growing concerns that need to be addressed in the soybean industry.

Keywords: Quotation, Fluctuations, Price variation, Sack

Introdução

Os mercados de commodities, especialmente os relacionados aos grãos, são notórios pela sua instabilidade de preços. Esta volatilidade é resultado de uma intrincada rede de fatores, tanto internos quanto externos, que influenciam diretamente o valor desses produtos essenciais. Fatores como safras em países produtores, estoques em nações concorrentes, condições climáticas adversas e demanda das indústrias de esmagamento e alimentícia desempenham papéis fundamentais nesse cenário. Além disso, questões internas, como o aumento dos custos da mão de obra e altas taxas tributárias, adicionam camadas adicionais de complexidade às flutuações dos preços dos grãos (Campeão *et al.*, 2020).

Entretanto, é necessário a previsão para as partes envolvidas (agricultores, empresas de alimentos, indústrias, traders, investidores, governo etc.) a previsão do preço da soja, uma vez que essa sazonalidade pode afetar significativamente a economia global e os mercados financeiros. Para entender quando vender sua produção, agricultores precisam saber o valor de mercado, afim de planejar suas safras e ter as melhores tomadas de decisões, já as empresas alimentícias usam as estimativas dos preços com o intuito de

planejarem seus preços e custos, por sua vez os traders e investidores usam as projeções para tomar decisões de investimentos e gerenciamentos de riscos, por fim, os governos monitoram o preço da soja para compreenderem todos os possíveis efeitos da inflação e tomar decisões de política econômica e conseqüentemente acordos e tratados de comércio (Cunha; Espíndola, 2015).

A commodity (matéria prima negociada em bolsas de valores) soja é um dos grãos mais cultivados ao redor do mundo, e no Brasil não é diferente, haja vista que nas últimas décadas do milênio passado havia emparelhado a lista de maiores produtores e conseqüentemente de exportadores mundiais, se tornando o maior produtor mundial nas últimas décadas do atual milênio. Na Bahia há um aumento na produção, muito por conta do crescimento das áreas cultivadas, bem como melhoramento nas tecnologias e uso de novas variedades resistentes a pragas e doenças e por conseguinte pela demanda cada vez maior do mercado externo e valorização do dólar, moeda de câmbio (da bolsa de valores de Chicago) e que dita o preço da commodities ao redor do mundo (Campeão; Sanches; Maciel, 2020).

Por conseguinte, entender a sazonalidade do preço da soja é de suma importância para futuras previsões e conseqüentemente melhor gerenciamento de risco, tomada de decisões e planejamento estratégico em vários setores da produção e comercialização, nas esferas da sociedade a fim de aproveitar os melhores preços do mercado em transações futuras, permitindo ao produtor uma melhor estabilidade financeira.

O estudo teve por objetivo realizar o levantamento dos valores comercializados da soja grão nos últimos dez anos (2010-2020), para observarmos a sazonalidade de variação de valores comercializados nos estabelecimentos regionais e suas possíveis justificativas para o comportamento dos valores no período de estudo.

Metodologia

Para realização do presente estudo, foram utilizados dados referentes ao preço da saca da soja grão comercializado na Bahia, disponibilizados pela Secretaria de Agricultura, Pecuária, Irrigação, Pesca e Aquicultura (SEAGRI), no período de janeiro de 2010 a dezembro de 2020. Os valores da série temporal dos preços diários foram obtidos no website da SEAGRI e, posteriormente, calculou-se as médias mensais e anuais, os desvios-padrões e os coeficientes de variação, para facilitar a visualização das variações reais ocorridas nos preços da soja grão no período, nas praças de Barreiras, Luiz

Eduardo Magalhães (LEM) e Salvador, havendo dados relevantes somente no período de 2014 a 2016, das duas últimas praças.

De posse dos dados, realizou-se a construção dos gráficos de médias mensais e anuais, onde podemos observar o comportamento dos preços da soja grão no período proposto nesse trabalho. Em seguida foram realizadas análises estatísticas para encontrarmos o comportamento, a sazonalidade e a tendência dos preços no período determinado para o estudo. E a previsão dos preços para os anos de 2021 e 2022, com base nos dados da série temporal apresentados.

Para melhor apresentação dos dados eliminando as variações sazonais anuais e obter os índices de sazonalidades (IS), foram calculadas as médias de preços trimestral para cada ano, obtendo o comportamento dos preços da soja grão no período estudado.

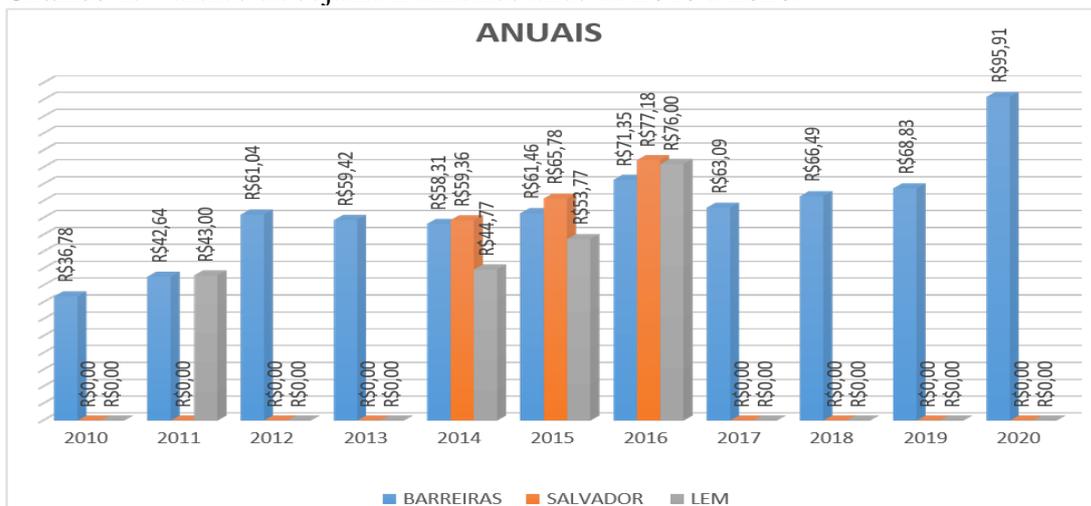
Posteriormente realizou-se a estimativa dos Índices médios de sazonalidades trimestral do período estudado, calculando a média dos (IS) e utilizou-se desses na equação da reta para determinarmos a previsão de preços da soja grão na Bahia, para os anos de 2021 e 2022.

Resultados e Discussão

A análise dos dados feita a partir da avaliação do valor da soja na Bahia, nas praças de Barreiras, Luiz Eduardo Magalhães (LEM) e Salvador entre os anos de 2010 a 2020 refletiu um cenário aparentemente equilibrado, com alterações sutis.

Dessa forma, observou-se que nos anos de 2010 e 2011, o valor da soja se concentrou entre R\$ 36,78 /saca (60 Kg) e R\$42,64 /saca (60 Kg). No ano de 2012 o aumento no valor do produto foi significativo, chegando a R\$61,04 e, posteriormente, em 2013, tendo uma pequena redução, que estabeleceu o preço em R\$ 59,42. Em 2014 houve outra pequena redução, quando a soja ficou com o valor de R\$ 58,31. No entanto, em 2015 e 2016 o produto voltou a aumentar, chegando ao valor de R\$ 61,46 e R\$ 71,35, respectivamente. Em 2017 o valor do produto voltou a cair, chegando a R\$ 63,09 e sofrendo poucas alterações nos anos de 2018 e 2019, que apresentaram índice de valor de R\$ 66,49 e R\$ 68,83. No entanto, a maior alta observada foi no período analisado foi em 2020, quando o valor da soja se estabeleceu em R\$ 95,91.

Gráfico 1. Valores da soja na Bahia nos anos de 2010 a 2020.



Fonte: SEAGRI, 2023.

Essa análise dos valores sobre o produto, tem diversos fatores, como o contexto econômico, a produção, os preços de mercado e as políticas governamentais. Por isso, cumpre destacar alguns aspectos principais que podem influenciar no cenário geral observado, o primeiro deles é que a produção de soja na Bahia aumentou significativamente ao longo dessa década, sendo assim, a região Oeste da Bahia se tornou uma das áreas de destaque na produção de soja no Brasil, impulsionando o aumento da produção do grão (Campeão *et al.*, 2020).

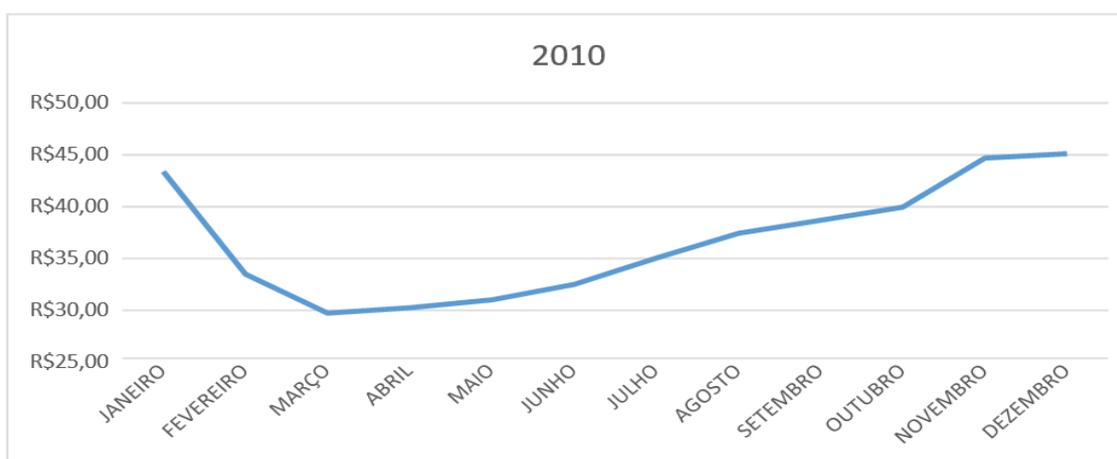
Assim, ao tempo que os preços da soja são influenciados por fatores globais, como a demanda internacional, a produção de outros países, as condições climáticas, a taxa de câmbio e as políticas comerciais, constatou-se que entre 2010 e 2020, houve flutuações significativas nos preços da soja, com especial destaque para os dois picos de valores observados em 2016 e 2020 (Adami; Ozaki; Miquelluti, 2022).

Essa oscilação pode ser atribuída a uma série de fatores, como o aumento da demanda internacional pelo produto, principalmente da China, o qual é o maior importador de soja do Brasil; e a desvalorização da moeda brasileira em relação ao dólar, especialmente em 2016 e 2020, o que fez com que os produtos brasileiros, incluindo a soja, se tornassem mais competitivos no mercado internacional, aumentando os preços em moeda local (Campeão *et al.*, 2020).

Cumpre destacar ainda que o governo brasileiro implementou políticas de estímulo à agricultura ao longo desse período, como financiamentos agrícolas e incentivos fiscais, que podem ter incentivado os agricultores a aumentarem a produção de soja (Adami *et al.*, 2022).

Em seguida, ao realizar a análise dos valores da soja na Bahia a partir do recorte temporal definido e por uma perspectiva anual, percebeu-se que ao longo de 2010 o valor da soja teve quedas significativas. Sobre esse cenário, em janeiro de 2010, o valor da soja era próximo dos R\$ 45,00, enquanto em fevereiro o produto já estava abaixo dos R\$ 35,00 e em março abaixo dos R\$ 30,00, mantendo-se relativamente estável até junho. Somente em junho o valor da soja superou novamente os R\$ 35,00, ultrapassando os R\$ 40,00 somente em outubro. Os maiores valores foram verificados apenas no fim do ano, quando em novembro e dezembro a soja alcançou o valor de R\$ 45,00. Os referidos dados estão representados de forma mais específica e esquematizada no gráfico 2.

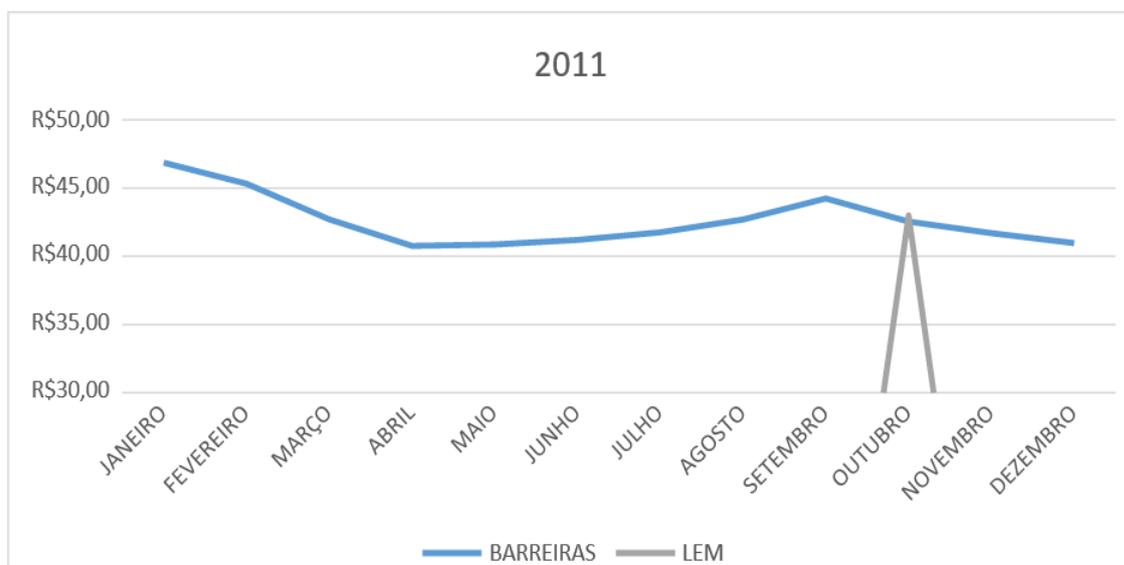
Gráfico 2. Valores mensais da soja ao longo do ano de 2010.



Fonte: SEAGRI, 2023.

Até o mês de fevereiro de 2011 o preço da soja permaneceu acima dos R\$ 45,00. No entanto, o produto só voltou a alcançar esse valor em setembro do referido, oscilando entre R\$ 40 e R\$ 44,00 nos meses anteriores. Além disso, mesmo se aproximando dos R\$ 45,00 em setembro, os meses de outubro, novembro e dezembro de 2011 foram de queda, voltando a chegar em R\$ 40,00. O Gráfico 3 apresenta as referidas oscilações.

Gráfico 3. Valores mensais da soja ao longo do ano de 2011.

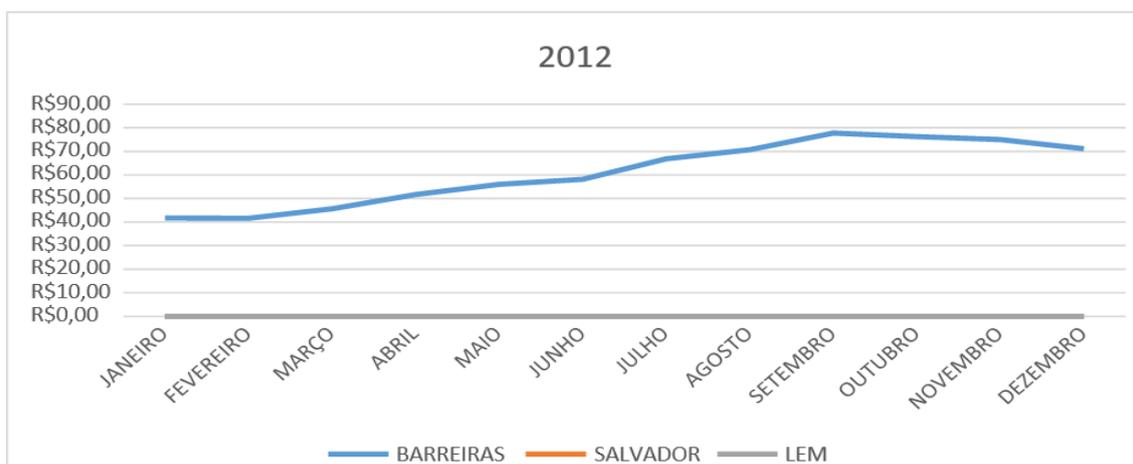


Fonte: SEAGRI, 2023.

Em 2012, o cenário observado foi de crescimento nos primeiros nove meses do ano, de modo que a soja custava R\$ 40,00 em janeiro e chegou a R\$ 80,00 até setembro, crescendo de maneira constante ao longo desse período. Entretanto, nos meses de outubro a dezembro houve uma pequena queda no valor da soja, que fechou o referido ano custando R\$ 70,00.

O Gráfico 4 reflete o cenário citado.

Gráfico 4. Valores mensais da soja ao longo do ano de 2012.

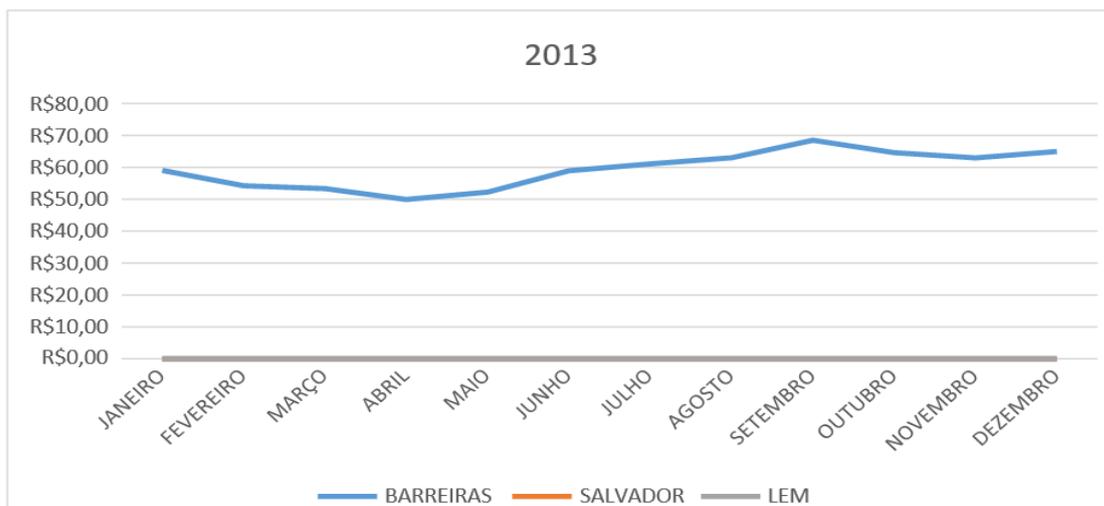


Fonte: SEAGRI, 2023.

Em 2013, é possível afirmar que o valor da soja se manteve equilibrado, iniciando o ano no valor de R\$ 60,00, com uma leve queda entre os meses de fevereiro a abril, quando chegou a R\$ 50,00. Voltou a crescer a partir de maio, até setembro, quando alcançou o valor de R\$ 70,00, novamente reduzindo nos meses seguintes, até encerrar o ano com um valor um pouco superior a R\$ 60,00.

O gráfico 5 reflete o cenário do preço da soja ao longo do ano de 2013.

Gráfico 5. Valores mensais da soja ao longo do ano de 2013.



Fonte: SEAGRI, 2023.

De acordo com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, em 2014 os maiores produtores mundiais de soja eram Brasil, Argentina e Estados Unidos, respondendo, juntos, por mais de 80% da área e da produção mundial do grão. Sobre essa produção, a Argentina, Brasil e Estados cresceram 94,2%, 121,5% e 19,3%, respectivamente, entre os anos de 2000 e 2014 (Estados Unidos, 2016).

Todavia, relacionando as informações mundiais sobre o cenário observado da produção de soja na Bahia entre os anos de 2010 a 2013, é importante citar que fatores climáticos desse período impactaram de maneira significativa e constante todos os países produtores de soja. No entanto, mesmo com esse desafio, Brasil e Argentina conseguiram manter relativo crescimento em seus índices de produtividade, o que, naturalmente, reflete também nos preços de mercado do produto (Hirakuri, 2014).

Sobre os dados de 2014 foram analisados os índices das três principais regiões comercializadoras de soja na Bahia, ou seja, Barreiras, Salvador e LEM, em razão de terem apresentado comportamentos diferentes sobre o preço da soja no mesmo período.

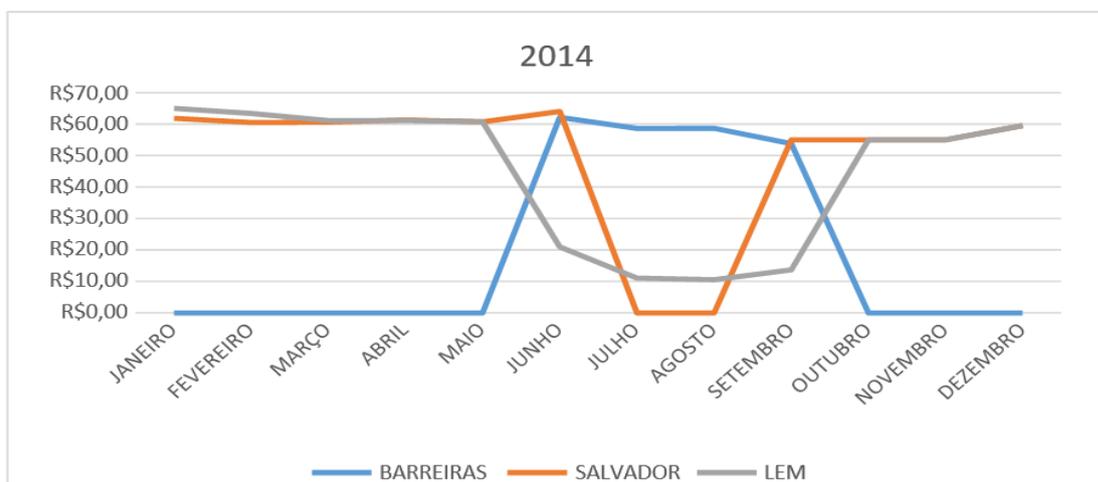
A esse respeito, o preço da soja nas regiões de Salvador e LEM iniciaram 2014 um pouco acima dos R\$ 60,00, se mantendo nessa faixa de valor até o mês de maio do referido ano. No entanto, na região de LEM, entre maio e setembro os valores de soja tiveram uma queda significativa, chegando a ficar abaixo de R\$ 20,00, crescendo novamente apenas a partir de outubro, se mantendo entre os R\$ 50,00 e R\$ 60,00 até o final do ano.

Os valores da região de Salvador apresentaram comportamento semelhante, mantendo-se estáveis até junho de 2014, e caindo significativamente em julho e agosto,

voltando a crescer em setembro e estabilizando seus valores entre R\$ 50,00 e R\$ 60,00 até o fim do ano.

Em contrapartida, a região de barreiras apenas apresenta índices de valor da soja relevantes entre os meses de maio a outubro de 2014, período convergente com as quedas das outras duas regiões mencionadas. Esses dados estão representados no gráfico 6.

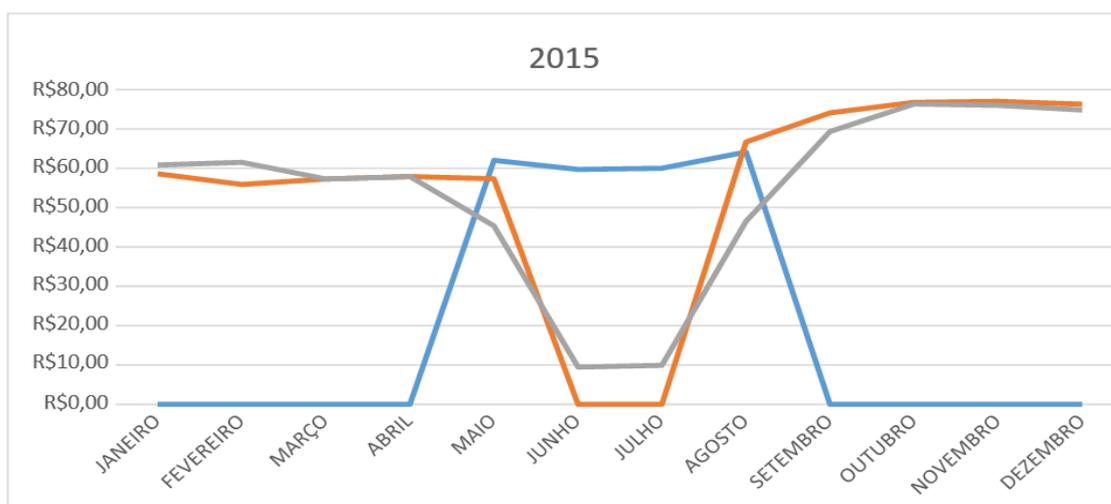
Gráfico 6. Valores mensais da soja ao longo do ano de 2014.



Fonte: SEAGRI, 2023.

Em 2015, o comportamento verificado sobre os valores da soja em cada uma das regiões foi bastante semelhante aos apresentados em 2014, com alteração apenas nos períodos em que houve as quedas e ascensões de cada região, antecipadas em um mês quando comparada ao ano anterior, conforme observa-se no gráfico 7.

Gráfico 7. Valores mensais da soja ao longo do ano de 2015.

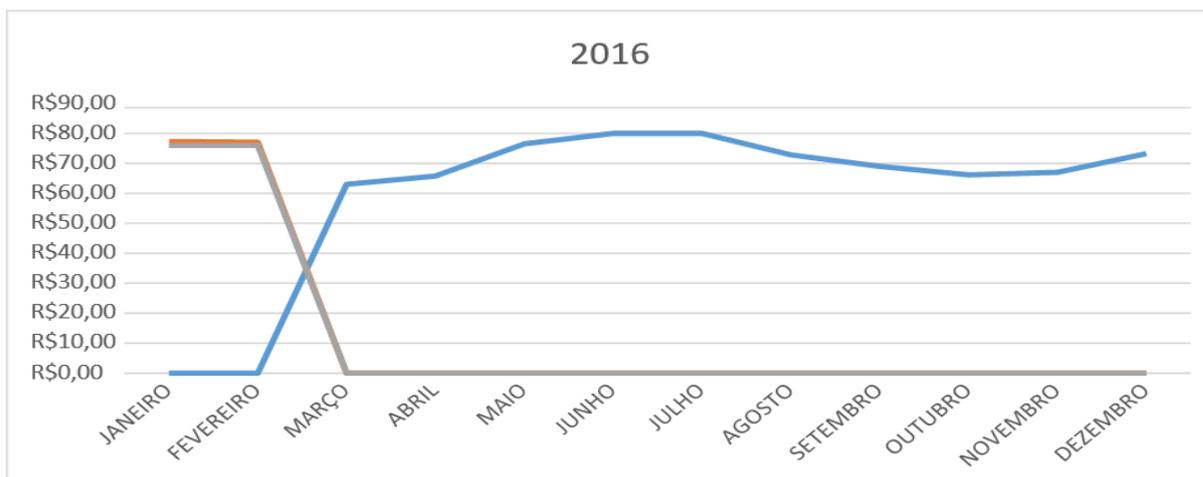


Fonte: SEAGRI, 2023.

Em 2016, os valores registrados mostraram crescimento apenas a partir de março, se estabelecendo um pouco acima de R\$ 60,00. Em maio, o valor da soja alcançou o valor de R\$ 70,00, e em junho chegou a R\$ 80,00, mantendo-se nesse valor até julho, quando voltou a declinar e manteve-se, em média, entre R\$ 60,00 e R\$ 70,00 até o fim do ano.

Este cenário pode ser observado nos dados apresentados no gráfico 8.

Gráfico 8. Valores mensais da soja ao longo do ano de 2016.



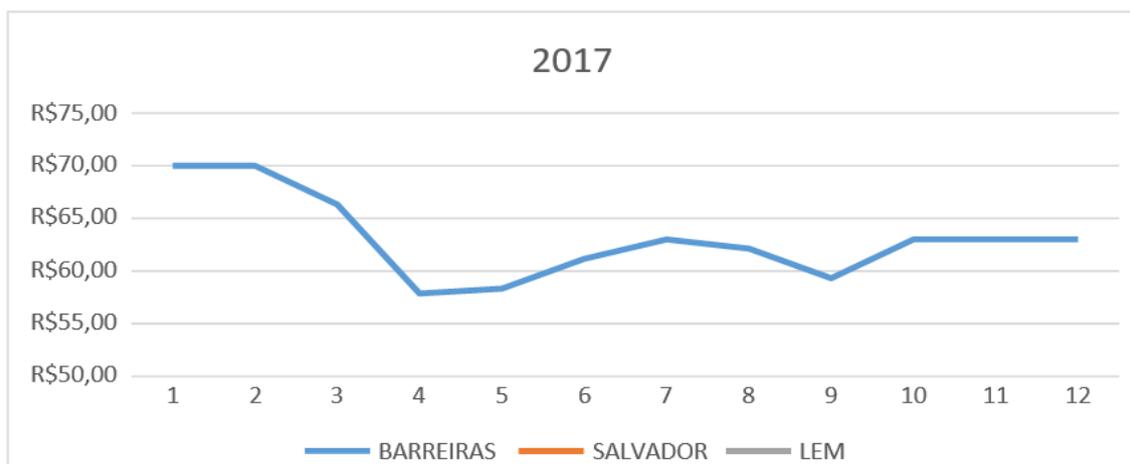
Fonte: SEAGRI, 2023.

Em 2014 e 2015, a Bahia enfrentou desafios climáticos, incluindo secas em algumas regiões, o que prejudicou o desenvolvimento da cultura da soja e reduziu os rendimentos. A produção de soja na Bahia tem se destacado por sua notável dinamicidade, abrangendo tanto a expansão das áreas cultivadas quanto a flutuação dos preços do grão e os volumes de exportação. Em contrapartida, enquanto no Brasil, nesse período, o plantio se encontrava atrasado em razão da seca, nos Estados Unidos a colheita já se encontrava praticamente finalizada, com safras recordes que pressionava as cotações na bolsa de Chicago. No Brasil, o mercado de outras culturas também foi prejudicado em algumas regiões, em razão da seca, que prejudicou o desenvolvimento das lavouras. Além disso, as quedas nas importações da China também impactaram significativamente os mercados interno e externo, o que contribuiu para o cenário negativo da economia de soja nesse período (Campeão *et al.*, 2020).

Em 2017 o preço da soja voltou a variar mensalmente, iniciando de janeiro a fevereiro com o valor de R\$ 70,00. No entanto, em meados de fevereiro a março foi possível observar uma significativa queda, que levou o produto ao valor de R\$ 65. Em abril o valor ficou abaixo dos R\$ 60,00, mantendo-se nessa média até agosto. Em setembro o produto voltou a ficar abaixo dos R\$ 60,00. Após esse período houve um novo crescimento, que garantiu um valor próximo aos R\$65 até o final do ano.

Os referidos dados estão dispostos no gráfico 9.

Gráfico 9. Valores mensais da soja ao longo do ano de 2017.

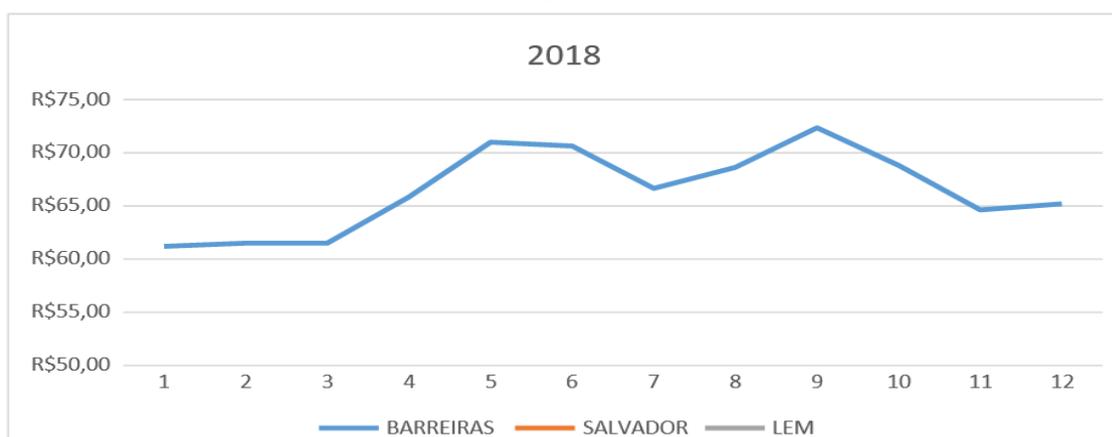


Fonte: SEAGRI, 2023.

Em 2018 a estabilidade de valor da soja se manteve até março, ficando um pouco acima de R\$ 60,00. Em abril, o produto aumentou de forma significativa, ultrapassando os R\$ 70,00 e mantendo esse valor até junho. No entanto, em julho o preço teve uma leve queda, voltando a crescer e ultrapassar os R\$ 70,00 reais em agosto e setembro. Até novembro os índices foram novamente de queda, mantendo-se em cerca de R\$ 65,00 até o fim do ano. A greve dos caminhoneiros pelos altos preços de diesel motivou as variações no ano.

No gráfico 10 são apresentados os referidos dados.

Gráfico 10. Valores mensais da soja ao longo do ano de 2018.

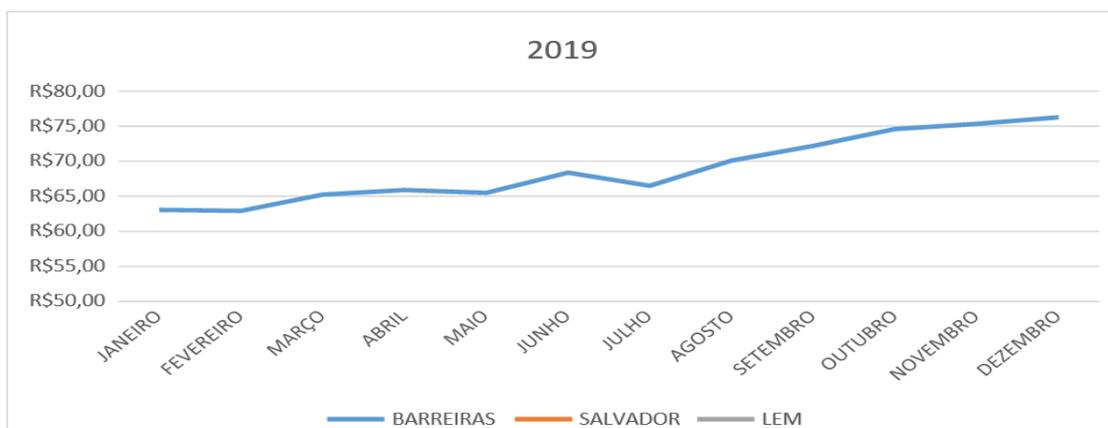


Fonte: SEAGRI, 2023.

O ano de 2019 apresentou um interessante cenário de ascensão do valor da soja de maneira quase plena ao longo dos meses. Dessa forma, em janeiro o produto estava cotado em mais de R\$ 60,00, mantendo-se nessa média até o mês de junho, quando se aproximou dos R\$ 70,00. Em julho houve uma pequena queda, superada já em agosto, quando os preços

se mantiveram em crescimento até o fim do ano. Em dezembro de 2019 a soja ultrapassou os R\$ 75,00. O cenário mencionado pode ser observado no Gráfico 11.

Gráfico 11. Valores mensais da soja ao longo do ano de 2019.

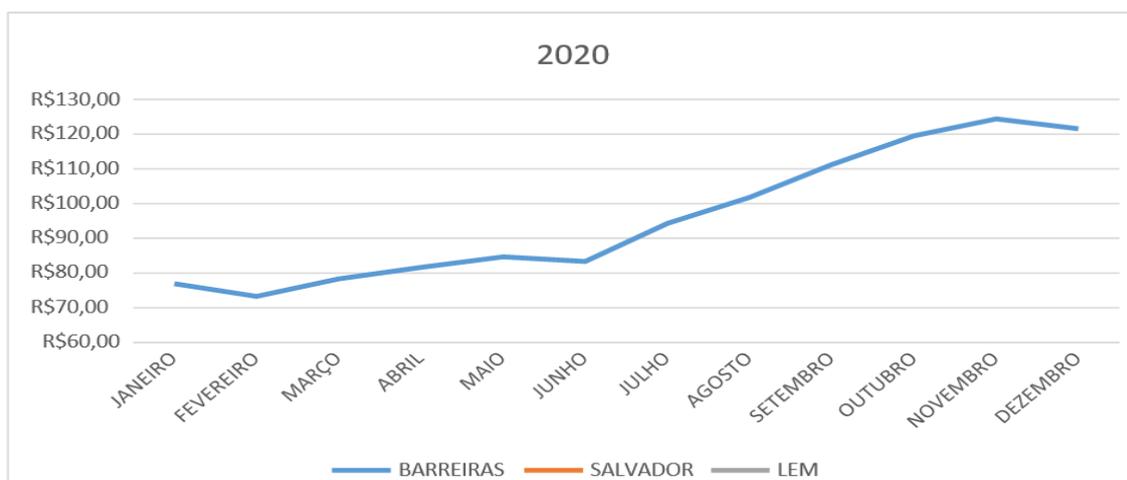


Fonte: SEAGRI, 2023.

Ao longo de 2020, os preços alcançados pela soja foram ainda mais relevantes, haja vista que em janeiro do referido ano custava R\$ 80,00, com uma leve queda em fevereiro, quando começava a pandemia do COVID-19 a se desencadear. No entanto, quando os valores do produto voltaram a subir a partir de março, esse crescimento foi gradativo a cada mês, voltando aos R\$ 80,00 em junho, ultrapassando os R\$ 120,00 em novembro e definindo R\$ 120,00 em dezembro.

O gráfico 12 demonstra o crescimento dos preços da soja ao longo do ano de 2020.

Gráfico 12. Valores mensais da soja ao longo do ano de 2020.



Fonte: SEAGRI, 2023.

Percebe-se que mesmo enfrentando algumas oscilações de valores, os preços da soja produzida na Bahia geralmente apresentam bons índices, crescendo não apenas mensalmente, mas também anualmente, o que dá base para perspectivas futuras positivas de

crescimento desse mercado no país e na região analisada. Assim, considerando que diversos fatores influenciam os valores de mercado da soja no Brasil, as justificativas para os índices observados estão relacionadas a vários fatores.

Primeiramente os fatores climáticos, que em determinado período influenciaram negativamente as produções e os preços do produto. Além disso, algumas pragas e doenças específicas que afetam a soja podem ter atingido algumas áreas produtoras na Bahia durante esses anos. Isso pode ter levado a perdas significativas na produção (Santos & Santos, 2023).

Outro fator determinante desse cenário é que os preços da soja são influenciados pela demanda global e pelas condições econômicas internacionais. Por isso, em alguns períodos os preços da soja podem ter caído a níveis que desencorajaram os agricultores a investir na cultura (Hirakuri, 2021).

Também é necessário ressaltar que a infraestrutura de transporte e logística é crucial para o escoamento da produção agrícola, de modo que os problemas na infraestrutura de estradas, portos e ferrovias podem dificultar o transporte da soja para os mercados, afetando a rentabilidade e a produção (Hirakuri, 2021).

No entanto, o comércio de soja na Bahia tem apresentado um crescimento significativo nas últimas décadas. A Bahia é um dos estados no Nordeste que mais tem se destacado na produção e exportação de soja, contribuindo para a expansão da agricultura no estado (Santos; Santos, 2023).

A Bahia possui um clima adequado para o cultivo da soja, com um longo período de cultivo e condições favoráveis de umidade. Isso permite a produção de safras consistentes. A esse respeito, deve-se destacar ainda que a pesquisa agrícola tem desempenhado um papel fundamental no crescimento da produção de soja na Bahia, pois através do desenvolvimento de variedades de soja mais resistentes e produtivas, a agricultura na região se tornou mais eficiente (Santos; Santos, 2023).

A Bahia diversificou seus mercados, exportando não apenas para a China, mas também para a Europa e países da América do Sul, reduzindo assim a dependência de um único mercado comprador. Esse crescimento é impulsionado pela expansão da área de plantio, adoção de tecnologias agrícolas modernas, desenvolvimento da infraestrutura e investimentos em pesquisa. Este destaque é particularmente pronunciado no extremo Oeste Baiano, região que detém a maior extensão de áreas plantadas e a produção mais significativa em todo o estado. Além disso, a evolução econômica da soja na área ao longo dos anos tem

sido impulsionada pela ampla adoção de pacotes tecnológicos nas propriedades rurais (Costa, Saulo Jonas Borges *et al.*, 2020).

Conclusão

A produção de soja na Bahia aumentou devido à demanda crescente, melhorias na infraestrutura e políticas governamentais. Apesar das flutuações nos preços, o setor se manteve competitivo globalmente. Questões ambientais e de sustentabilidade são preocupações crescentes. As perspectivas futuras são positivas, com a demanda global em alta, especialmente na alimentação animal e na indústria de alimentos, impulsionada pela urbanização em países em desenvolvimento e pelo crescimento dos mercados de alimentos vegetarianos e veganos.

Por fim, mudanças climáticas e eventos climáticos extremos também podem afetar a produção de soja, causando flutuações nos preços e na disponibilidade do produto, razão pela qual pesquisas contínuas sobre variedades de soja de alto rendimento, resistência a pragas e doenças, e práticas agrícolas sustentáveis podem melhorar a produtividade e a eficiência do cultivo.

Referências

ADAMI, A.C.O.; OZAKI, V.A.; MIQUELLUTI, D.L. Efeito de alterações no preço de referência sobre as indenizações do Seguro Agrícola de Faturamento da soja no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, 2022. 18 p.

CAMPEÃO, P.; SANCHES, A.C.; MACIEL, W.R.E. Mercado Internacional de Commodities: uma análise da participação do Brasil no mercado mundial de soja entre 2008 e 2019. **Desenvolvimento em Questão**, 2020. 51 p.

COSTA, S.J.B.; ARAÚJO, A.C.; SANTOS, G.D.; SOUZA, L.B.; SOUZA, M.J.M.; GOMES, A.S. Análise Econômica Do Agronegócio Da Soja Na Bahia, Brasil. **Contribuciones A Las Ciencias Sociales**. 2020.

CUNHA RC, ESPÍNDOLA C J. (2015). A dinâmica geoeconômica recente da cadeia produtiva da soja no Brasil e no mundo. *GeoTextos*, 11, 1.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA (EUA). DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA (USDA). **Data and Statistics**. Washington, D.C., 2016. Disponível em: <http://www.usda.gov/wps/portal/usda/>. Acesso em: 20 maio. 2023.

HIRAKURI, M.H. O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro. **il. – (Documentos / Embrapa Soja, ISSN 2176-2937; n. 349)2014**. Londrina: Embrapa, Soja. 2014, 70 p.

SANTOS, E.J.; SANTOS, J.A.G. A pegada hídrica para a produção de soja na região oeste da Bahia entre 2006-2019. **Informe GEPEC**. 2023. 27 p.

CAPÍTULO 4

MECANISMOS DE SOLUBILIZAÇÃO DE FÓSFORO POR MICORRIZAS E NUTRIÇÃO FOSFATADA

MECHANISMS OF PHOSPHORUS SOLUBILIZATION BY MYCORRHIZAE AND PHOSPHORUS NUTRITION

DOI: <https://doi.org/10.56001/24.9786500981315.04>

Submetido em: 23/10/2024

Revisado em: 01/11/2024

Publicado em: 05/11/2024

Damiana Amancio de Souza

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Mestre em Ciências Agrárias, Cruz das
Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/4924641421179266>

Mariana Dantas Silva

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Mestre em Ciências Agrárias, Cruz das
Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/1387506636289718>

Larissa dos Santos Machado

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Mestranda em Ciências Agrárias, UFRB,
Cruz das Almas – BA

<https://orcid.org/0009-0006-2093-5171>

Maria Selma dos Santos Silva

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Mestre em Ciências Agrárias, Cruz das
Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/2450041157330379>

Sandra Selma Marques de Souza

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Doutoranda em Ciências Agrárias,
UFRB, Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/8063376631228461>

Leone Ricardo de Carvalho Santana

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Doutorando em Ciências Agrárias,
UFRB, Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/5275047496672301>

Luiz Edmundo Cincura de Andrade Sobrinho

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Doutorando em Ciências Agrárias,
UFRB, Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/8521549955215670>

Daniele Oliveira Cunha

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Mestranda em Ciências Agrárias, UFRB,
Cruz das Almas – BA

<https://lattes.cnpq.br/7754586103908212>

Camilla Pereira Furtado de Souza

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Mestranda em Ciências Agrárias, UFRB,
Cruz das Almas – BA

<https://orcid.org/0000-0001-6605-0439>

Ossival Lolato Ribeiro

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Dr. Prof. Adjunto, UFRB, Cruz
das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/1497977439998897>

Resumo

O fósforo é um macronutriente essencial para o crescimento vegetal, limitado na maioria dos solos devido à sua baixa mobilidade e à complexação com íons. As micorrizas, associações simbióticas entre fungos e raízes de plantas, desempenham um papel importante na solubilização de fósforo, aumentando a disponibilidade desse nutriente para as plantas. Esta revisão visa explorar os mecanismos pelos quais as micorrizas, como microrganismos solubilizadores de fosfato, aumentam a disponibilidade de fósforo no solo, destacando a importância dessa associação para a nutrição das plantas. Foram analisados artigos científicos e livros sobre a solubilização de fósforo, utilizando bases de dados como Google Acadêmico e Scopus. As buscas incluíram palavras-chave relevantes e priorizaram publicações a partir de 2013. As micorrizas utilizam diversos mecanismos, como a excreção de ácidos orgânicos e a mineralização, para solubilizar o fósforo presente no solo. A interação entre microrganismos, solo e plantas é fundamental para a ciclagem do P, impactando diretamente a produtividade agrícola. A implementação de práticas que estimulem a formação de micorrizas pode reduzir a dependência de fertilizantes químicos, promovendo uma agricultura mais sustentável e eficiente. Essa abordagem não apenas melhora a disponibilidade de nutrientes, mas também contribui para a preservação do meio ambiente.

Palavras-Chave: Nutrição de planta, Fungos micorrízicos arbusculares, interação solo-planta, agricultura sustentável

Abstract

Phosphorus is an essential macronutrient for plant growth, limited in most soils due to its low mobility and complexation with ions. Mycorrhizae, symbiotic associations between fungi and plant roots, play an important role in phosphorus solubilization, increasing the availability of this nutrient for plants. This review aims to explore the mechanisms by which mycorrhizae, as phosphate-solubilizing microorganisms, enhance phosphorus availability in the soil, highlighting the importance of this association for plant nutrition. Scientific articles and books on phosphorus solubilization were analyzed, using databases such as Google Scholar and Scopus. The searches included relevant keywords and prioritized publications from 2013 onward. Mycorrhizae utilize various mechanisms, such as the excretion of organic acids and mineralization, to solubilize phosphorus present in the soil. The interaction among microorganisms, soil, and plants is fundamental for phosphorus cycling, directly impacting agricultural productivity. Implementing practices that encourage the formation of mycorrhizae can reduce reliance on chemical fertilizers, promoting more sustainable and efficient agriculture. This approach not only improves nutrient availability but also contributes to environmental preservation.

Keywords: Plant nutrition, arbuscular mycorrhizal fungi, soil-plant interaction, sustainable agriculture.

Introdução

O fósforo (P) é um nutriente que desempenha funções essenciais no crescimento e desenvolvimento dos vegetais sendo um macronutriente essencial para a sobrevivência da planta. No solo, o P é encontrado nas formas orgânica e inorgânica, mas geralmente está indisponível para a absorção devido à sua complexação com íons. O fósforo orgânico origina-se dos resíduos vegetais incorporados no solo, da biomassa microbiana e de subprodutos da decomposição. Devido à sua forte interação com óxido de Fe, Ca e Al, o P torna-se deficiente na maior parte dos solos agrícolas.

Os microrganismos solubilizadores de fosfatos, que convertem formas insolúveis de fosforo em formas solúveis, são boas opções para estimular o crescimento das plantas com aumento do teor de P solúvel, um dos principais macronutrientes que limitam o crescimento vegetal (Karvani; Esfahani, 2021). Além disso, a disponibilidade de nutrientes é influenciada pelos microrganismos, que melhoram a estrutura do solo e degradam poluentes orgânicos por meio do ciclo dos nutrientes (Aguilar; Barea, 2015), contribuindo para a manutenção da fertilidade do solo.

O uso excessivo de fertilizantes fosfatados é uma grande preocupação ambiental. O uso de fungos micorrízicos arbusculares destaca-se como uma abordagem eficiente e economicamente viável para melhorar a disponibilidade de fosforo (Aguilar e Barea, 2015; An *et al.*, 2022; Devi *et al.*, 2022). O objetivo dessa revisão é compreender os diferentes mecanismos dos microrganismos solubilizadores de fosfato e sua importância para a disponibilidade de nutrientes para as plantas.

Metodologia

Nesta revisão, foram utilizados artigos publicados em revistas científicas nacionais e internacionais, entretanto, também foram incluídos livros. Foram realizadas buscas nas bases de dados: Google Acadêmico, Scopus, Periódicos CAPES, PubMed e SciELO. Para facilitar a busca pelas publicações científicas, foram utilizadas palavras-chave como: “mecanismos solubilização P”, “fósforo no solo”, “biomassa microbiana”, “nutrição fosfatada”, “fungos solubilizadores de P”, “fungos micorrízicos arbusculares”, e “mineralização”, em português e inglês. Deu-se preferência a artigos publicados após o ano de 2013, entretanto, foram utilizados alguns artigos com data inferior a 2013.

O fósforo

O fósforo (P) é um dos nutrientes mais limitantes nos solos agrícolas e para a produção das culturas, principalmente, devido à sua baixa mobilidade no solo (Battini *et al.*, 2017). Contudo, o P é facilmente absorvido na presença de nitrogênio, silício e boro, além da matéria orgânica (Primavesi; Primavesi 2018). Ele ocorre naturalmente na forma de fosfato nas rochas fosfáticas, como as apatitas (Pantano *et al.*, 2016).

As plantas absorvem o P do solo, onde pode ser encontrado na forma inorgânica, decorrente do intemperismo da rocha, ou como fosfatos provenientes de plantas, animais ou microrganismos em decomposição (Behera *et al.*, 2014). O P pode ser solubilizado e disponibilizado para as plantas e microrganismos quando encontrada condições adequadas (Behera *et al.*, 2014). O P é um fator limitante para a produtividade das culturas em solos áridos e semiáridos (Ahmad *et al.*, 2018; Berg *et al.*, 2018).

A maior parte do fósforo é assimilado pelas plantas como íon ortofosfato primário e secundário dependendo do pH do solo (Zhu *et al.*, 2018). Na biomassa microbiana, também é possível encontrar P disponível fixado, que será disponibilizado para as plantas somente após a morte e degradação da biomassa. Portanto, a disponibilidade de P no solo é controlada por processos biológico, como solubilização de P, mineralização e taxas de imobilização (Alori *et al.*, 2017). Ainda que a maioria dos solos apresente consideráveis estoques totais de P, apenas uma pequena fração (1%) do P inorgânico total e P orgânico é dissolvido em qualquer momento (Bünemann, 2015).

O P realiza diversas funções nas plantas, como por exemplo, ativação enzimática e o armazenamento de energia (ATP), além de ser componentes dos ácidos nucleicos e fosfolipídios, sendo responsável em parte pela síntese de celulose e sacarose (Cozzolino,

2013; Taiz *et al* 2017; Bilhar *et al.*, 2019;) e pelos processos metabólicos da planta, como fotossíntese e respiração (Khan *et al.*, 2010).

A reserva do P no solo nas formas orgânicas e inorgânicas, tem suprimento limitado para as plantas devido à fixação e formação de complexos com outros nutrientes do solo (Rowat *et al* 2020). A adubação fosfatada está relacionada à nutrição das plantas, um suprimento adequado de P promove o desenvolvimento das raízes, levando a uma maior absorção de nutrientes (Hinsinger *et al.*, 2015).

Segundo Vilar e Moreira-Vilar (2013), o desempenho do fosforo no solo modifica com a mineralogia, o que pode afetar a disposição de adsorção de P. Solos com diferentes disposições de adsorção fazem com que as plantas ajustem seu metabolismo para serem mais eficiente no uso deste elemento. No solo, o P passar por vários processos biogeoquímicos que transformam sua disponibilidade. A disponibilidade de P no solo está inteiramente relacionada às condições em que o P se encontra (Liang *et al.*, 2017).

Annaheim *et al* (2015) mostraram que o uso combinado de minerais com fertilizantes orgânicos afeta principalmente as concentrações de Pi no solo. Assim, os fertilizantes P influenciam diretamente a concentração de Pi no solo, pela entrada de ortofosfato e compostos orgânicos, ou indiretamente pela interação com compostos do solo (Yan *et al.*, 2016). Nas plantas, o P é responsável pelo aumento no desenvolvimento das raízes, melhoramento na formação de sementes, fortalecimento do caule e fixação de nitrogênio.

Fatores ambientais que afetam a ciclagem de P do solo são complexas e variam de acordo com as atividades mediadas pelos microrganismos, estrutura do solo, mineralização da matéria orgânica, pH e relações hídricas, dentre outros (Cui *et al.*, 2019; Merino *et al.*, 2019; Upreti *et al.*, 2019). Um fator que vai determinar a utilização da adubação fosfatada é a eficiência da absorção do P pelas plantas. Os microrganismos exercem grandes influência na obtenção de P pelas culturas; presentes na rizosfera, promovem a absorção do P facilitando o desenvolvimento da planta. Os microrganismos saprófitos que estimulam a fixação de nitrogênio ou a mobilização de fósforo, são fundamentais para a manutenção da produtividade das plantas.

O desenvolvimento das micorrizas altera as propriedades biológicas e químico-físicas da rizosfera, dando origem ao termo micorrizosfera. A micorrizosfera das leguminosas é particularmente importante, pois envolve uma relação com bactérias fixadoras de nitrogênio (Aguilar; Barea, 2015).

A potencialização de fungos micorrízicos arbusculares deve ser estimulada para elevar a absorção de nutrientes pelas plantas, estimular o sistema de defesa vegetal e promover o crescimento e produção da cultura. Além disso, o uso das micorrizas pode diminuir os custos de produção e melhorar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Os fungos micorrízicos ampliam a área de exploração das raízes das plantas, conseqüentemente, aumenta a absorção de nutrientes e a extensão do solo do qual o fosfato poderá ser absorvido (An *et al.*, 2022; Devi *et al.*, 2022; Gupta *et al.*, 2022). Aproveitar ao máximo o P orgânico (Po), continua sendo um desafio significativo. As dificuldades incluem preparo do solo, manejo de resíduos e práticas de fertilização, bem como os efeitos das interações entre microrganismos do solo, estrutura do solo e matéria orgânica nas frações de P do solo (Zhu *et al.*, 2018).

A utilização de microrganismos solubilizadores de fosfatos é necessário para aumentar a disponibilidade de fósforo no solo. Diversos gêneros de microrganismos são capazes de transformar P insolúvel em P solúvel e acessível as plantas (Sharma *et al.*, 2013; Alori *et al.*, 2017; Shrivastava *et al.*, 2018). Entretanto, o P é solubilizado mais ligeiramente em climas quentes e úmidos, enquanto em climas frios e secos e solubilizado lentamente e em solos aerado a solubilização do fósforo é mais rápida quando comparado a um solo úmido saturado (Alori *et al.*, 2017).

Os vegetais são responsáveis pela absorção do P do solo, os animais se alimentam desses vegetais, e os microrganismos são responsáveis pela decomposição e reciclagem biológica desse nutriente, disponibilizando-o novamente para as plantas (Widdig *et al.*, 2020). Os principais mecanismos de solubilização de fosfato inorgânico no solo ocorrem pela redução do pH, pela produção microbiana de ácidos orgânicos e pela mineralização do P orgânico por fosfatases ácidas (Behera *et al.*, 2014).

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) aumentam a área de absorção da zona radicular, conseqüentemente, melhoram a capacidade da planta em absorver mais nutrientes e água do solo. As raízes micorrízicas melhoram a rizosfera, aumentando a quantidades de fungos disponível e promovendo o desenvolvimento da planta, graças às hifas que facilitam a absorção e translocação de nutrientes (Aguilar; Barea, 2015; Bi *et al.*, 2020).

Os fungos micorrízicos arbusculares e os mecanismos de solubilização de fósforo

A mineralização, solubilização e imobilização são as formas principais de disseminação do fósforo no solo pelos microrganismos solubilizadores de fósforo (MSF), sendo esses instigados por minerais inorgânicos presentes no solo (Rawat *et al.*, 2020). A mineralização ocorre por vários fatores, principalmente devido às condições ambientais que modificam a atividade microbiana, como fração de tamanho do solo, cobertura vegetal e a densidade (Rita *et al.*, 2013).

A solubilização do fósforo é um fenômeno complexo que depende de fatores nutricionais, fisiológica e de crescimento da cultura. Além disso, os microrganismos promovem o crescimento vegetal por meio da produção de compostos promotores de crescimento (Rawat *et al.*, 2020). Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) podem aumentar a disponibilidade do P, minimizar o uso de fertilização química e contribuindo para uma agricultura mais sustentável. Eles auxiliam as plantas na utilização de fontes de P de baixa solubilidade, disponibilizando formas absorvíveis pelos vegetais (Etesani *et al.*, 2021).

Os mecanismos de solubilização de fosfato inorgânico, envolvem a produção de ácidos orgânicos e inorgânico, liberação de prótons do NH_4^+ , produção de quelantes e complexantes capazes de mobilizar sobretudo P ligado ao ferro (Rawat *et al.*, 2020; Etesami *et al.*, 2021). Ácidos como cítrico, glucônico, oxálico, tartárico, láctico desempenham papel importante na formação de complexos com ferro, alumínio ou cálcio, liberando P para as plantas (Behera *et al.*, 2013; Kaur; Reddy, 2014).

Ácidos inorgânicos, como clorídrico, sulfúrico, nítrico e carbônico, também atuam na solubilização de fosfato, embora tenha baixa eficiência quando comparado aos ácidos orgânicos. Esses mecanismos são adotados por microrganismos como *Nitrobacter* e *Thiobacillus* spp. (Shrivastava *et al.*, 2018).

Enzimas como fitase e fosfatase também desempenha um papel na solubilização do P, liberando o fósforo de materiais orgânicos que são posteriormente armazenados na forma de fitato. Contudo, os ácidos orgânicos apresentam maior eficácia do que os inorgânicos na liberação de fosfato (Alori *et al.*, 2017).

Micorrizas, fungos em simbiose com as raízes das plantas, trazem benefícios para ambos os organismos. Com exceção das *Crucíferas* e *Liliáceas*, todas as outras espécies possuem micorrizas, existem também as que são dependentes das micorrizas em seu

desenvolvimento quando recém germinadas que são as orquídeas (Primavesi, 2021). FMA são especialmente eficientes na absorção de nutriente como o fosfato (Kobae, 2019), e melhoram o crescimento vegetal aumentando a absorção de água e nutrientes pela presença das hifas.

Nutrição fosfatada

No solo, o P é comumente encontrado na forma orgânica e na fração inorgânica, constituindo sobretudo de fosfato (H_2PO_4^-), sendo está dominante na solução do solo e assimilável pelas plantas e microrganismos do solo (Cardoso; Andreote, 2016). O P tem como função principal a realização da molécula de ATP para os processos energéticos da planta, assim como a fotossíntese e é um elemento indispensável na divisão celular, consequentemente ele se encontra concentrado no meristema e em todas as partes no processo de desenvolvimento e crescimento da planta (Primavesi; Primavesi, 2018), sendo indispensável na floração e formação de sementes.

Como é considerado um elemento de baixa mobilidade no solo, devido a um comportamento imposto pela sua relação com os minerais da argila aos quais são fixados, o P é um elemento relevante em solos tropicais nos quais apresentam elevados teores de óxidos de ferro e alumínio nas partículas do solo, pelos quais o P tem muita afinidade ou por vezes é fixado como fósforo biológico nos microrganismos do solo (Taiz *et al.*, 2017).

A produção e liberação de ácidos orgânicos e inorgânicos produzidos por plantas e microrganismos estão principalmente relacionadas aos mecanismos de solubilização de Pi em argila e ou óxidos de ferro de Al e Fe isoladamente (Cardoso; Andreote, 2016). Segundo Taiz *et al.* (2017) a absorção do fosfato através das raízes quase que exclusivamente da solução do solo, e sua assimilação é realizada com a formação do ATP. A partir da ATP, o fosfato poderá ser transferido a vários compostos distintos de carbono nas células vegetais.

O P disponível para as plantas está relacionado a processos de precipitação e adsorção das formas inorgânicas. Entretanto a absorção de P em solos com textura argilosa que contém íons de ferro e alumínio é maior. Nos estudos de Jorhi *et al.* (2015) e Santos *et al.* (2016), solos de semiárido com maior proporção de argila obtiveram uma maior fixação de P. A absorção do P pelas raízes das plantas é realizada pelo processo de difusão do P no solo, que ocorre lentamente atendendo a demanda da planta. Assim é importante ressaltar a colaboração dos micélios dos FMA, que são responsáveis por explorar um maior volume de solo e têm alta relação com íons de fosfato (Jorhi *et al.*,

2015). O aumento das hifas minimiza a distância entre as raízes e os nutrientes, consequentemente, diminui a distância de difusão de íons de fosfato.

O aumento da absorção de P via micélio extrarradiculares pode ser decorrente de uma exploração mais minuciosa do volume de solo, disponibilizando fosfatos antes inacessíveis às raízes e diminuindo a distância de difusão de íons de fosfato. Eles também podem explorar melhor o solo porque seu diâmetro médio é menor que o dos pelos radiculares e podem entrar em áreas do solo inacessíveis às raízes, aumentando a superfície de absorção. Kaiser *et al.* (2015) concluíram que a concentração de P nas hifas é maior quando comparado a solução do solo. As hifas são capazes de absorver uma quantidade mais elevada de fosfato que as raízes das plantas, isso ocorre devido a seu maior volume de exploração do solo, após a absorção elas armazenam na forma de polifosfatos, posteriormente são transferidos de forma contínuam para as plantas.

As bactérias e fungos do solo são capazes de solubilizarem fosfato inorgânico, por vezes insolúveis na forma de sais de cálcio, alumínio ou ferro. Diversos gêneros possuem espécies capazes de solubilizar fosfatos. Os mecanismos adotados para a solubilização do cálcio fundamentada sobretudo na acidificação do meio, além disso estão relacionados processos de quelação (Aguilar e Barea, 2015).

Devido a sua baixa mobilidade e alta disposição à adsorção em óxidos de Fe e Al permite que o P se torne deficiente em quase todos os solos brasileiros. E para os fosfatos de Fe e Al, a solubilização ocorre através do processo de produção de ácidos orgânicos quelantes. Quando ocorre de forma eficiente o processo de quelação sequestra o Ca, Fe e Al e libera o P para a solução do solo (Aguilar; Barea, 2015; Cardoso; Andreote, 2016).

Os fungos podem ser considerados como mais eficientes no processo de solubilização de fosfato inorgânico quando comparados as bactérias (Cardoso e Andreote, 2016). Os microrganismos do solo são responsáveis pela liberação de várias enzimas como por exemplo as fosfatases ácidas, alcalinas e fitases, que são responsáveis pela liberação de ortofosfato a partir do fitato (Cardoso e Andreote, 2016). As formas de P-lábil, também conhecidas como P-disponível e P-no-lábil ou P-indisponível, são as que definem o Pi. O P disponível é o P solúvel, que as plantas e microrganismos da sola podem absorver. Na solução solo, o P está presente como ácido fosfato (H_3PO_4), ácido ortofosfato ($H_2PO_4^-$), ácido monofosfato (HPO_4^{2-}) e ácido sobre fosfato (PO_4^{3-}), com a presença e dominância de cada um dependendo o pH da solução solo (Cardoso e Andreote, 2016).

Considerações finais

A importância do fósforo é amplamente reconhecida, tanto no ciclo biogeoquímico quanto nos ciclos antrópicos de produção de alimentos. O P é um recurso natural não renovável, relativamente escasso, imóvel e altamente propenso à fixação em solos tropicais. Estima-se que se todo o P acumulado no solo agrícola pela adubação fosfatada pudesse ser disponibilizado para as plantas, isso seria suficiente para atender a demanda das plantas longos anos.

Diversos estudos buscam alternativas para suprir as necessidades de P das culturas com menor custo. Nesse sentido, a microbiota do solo é fundamental para o ciclo do P nos ecossistemas, devido à sua capacidade de mineralizar a matéria orgânica e solubilizar o fosfato inorgânico, um aspecto muitas vezes negligenciado ou subestimado em pesquisas e manejos do solo.

Estudos sobre solubilização de P por microrganismos devem ir além da identificação de grupos microbianos com esse potencial, focando também na análise de sua atividade direta no campo. As raízes das culturas podem ser colonizadas com várias espécies de FMA. Com os avanços nas tecnologias de sequenciamento de alto rendimento, o estudo da absorção de fosfato em condições de campo torna-se uma nova fronteira na pesquisa sobre micorrizas, sendo essencial para o manejo da nutrição de P das culturas. Assim, o entendimento da dinâmica de colonização e da genética dos FMA de campo, bem como sua funcionalidade, será crucial.

As características físicas, químicas e microbiológicas do solo devem ser consideradas no desenvolvimento de técnicas agrícolas mais eficazes, como o uso de fertilizantes, prolongando a vida útil das reservas de fosfato e melhorando a produção agrícola. E, sem dúvida, o uso intensivo das micorrizas pode ajudar a reduzir o P fixado no solo, tornando-o mais disponível para as plantas e diminuindo a necessidade de adubação fosfatada.

Diversos mecanismos atuam sinergicamente para mobilizar as reservas de P (orgânico e inorgânico), aumentando sua disponibilidade no solo e facilitando sua absorção pelas raízes, resultando em uma melhor nutrição fosfatada para as plantas. Para atender às futuras demandas por alimentos saudáveis e preservar a qualidade ambiental, é necessária promover uma produtividade sustentável nos sistemas agrícolas. Alcançar esses objetivos é essencial para a sustentabilidade dos agroecossistemas.

Referências

- AN, X.; LIU, J.; LIU, X.; MA, C.; ZHANG, Q. Optimizing Phosphorus Application Rate and the Mixed Inoculation of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Phosphate-Solubilizing Bacteria Can Improve the Phosphatase Activity and Organic Acid Content in Alfalfa Soil. **Sustainability**, 2022, 11342 p. <https://doi.org/10.3390/su14181134>.
- AHMAD, M.; AHMAD, M.; EL-NAGGAR, A. H.; USMAN, A. R.; ABDULJABBAR, A.; VITHANAGE, M.; ELFAKI, J.; ABDULELAH, A. F.; AL-WABEL, M. I. Aging effects of organic and inorganic fertilizers on phosphorus fractionation in a calcareous sandy loam soil. **Pedosphere**, 2018. 873–883p. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60363-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60363-1).
- ALORI, E. T.; GLICK, B. R.; BABALOLA, O. O. Microbial Phosphorus Solubilization and Its Potential for Use in Sustainable Agriculture. **Frontiers in Microbiology**, 2017. 971 p. doi: 10.3389/fmicb.2017.00971.
- ANNAHEIM, K. E.; DOOLETTE, A. L.; SMERNIK, R. J.; MAYER, J.; OBERSON, A.; FROSSARD, E.; BÜNEMANN, E. K. Long-term addition of organic fertilizers has little effect on soil organic phosphorus as characterized by P NMR spectroscopy and enzyme additions. **Geoderma**, 2015. 257–258 p. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971>.
- BATTINI, F.; GRONLUND, M.; AGNOLUCCI, M.; GIOVANNETTI, M.; JAKOBSEN, I. Facilitation of phosphorus uptake in maize plants by mycorrhizosphere bacteria. **Scientific Reports**, 2017. 4686 p.
- BEHERA, B. C.; SINGDEVSACHAN, S. K.; MISHRA, R. R.; DUTTA, S. K.; THATOIOD, H. N. Diversity, mechanism and biotechnology of phosphate solubilising microorganism in mangrove—A review. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, 2014. 97-110 p. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2013.09.008>.
- BERG, W. K.; LISBRANT, S.; CUNNINGHAM, S. M.; BROUDER, S. M.; VOLENEC, J. J. Phosphorus and potassium effects on taproot C and N reserve pools and long-term persistence of alfalfa (*Medicago sativa* L.). **Plant Science**, 2018. 301–308 p. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.02.026>.
- BI, W.; WENG, B.; YAN, D.; WANG, H.; WANG, M.; YAN, S.; JING, L.; LIU, T.; CHANG, W. Responses of phosphate-solubilizing microorganisms mediated phosphorus cycling to drought-flood abrupt alternation in summer maize field soil. **Front Microbiol**, 2020. 768921. doi: 10.3389/fmicb.2021.768921.
- BÜNEMANN, E. K. Assessment of gross and net mineralization rates of soil organic phosphorus – a review. **Soil Biology and Biochemistry**, 2015. 82–98 p. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.06.026>.
- CUI, H.; OU, Y.; WANG, L.; WU, H.; YAN, B.; LI, Y. Distribution and release of phosphorus fractions associated with soil aggregate structure in restored wetlands. **Chemosphere**, 2019. 319–329 p. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.02.046.

COZZOLINO, V.; DI MEO, V.; PICCOLO, A. Impact of arbuscular mycorrhizal fungi applications on maize production and soil phosphorus availability. **Journal of Geochemical Exploration**, 2013. 40 – 44 p. doi: 10.1016/j.gexplo.2013.02.006.

ETESAMI, H.; JEONG, B. R.; GLICK, B. R. Contribution of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Phosphate-Solubilizing Bacteria, and Silicon to P Uptake by Plant. **Frontiers in Plant Science**, 2021. 699618. doi: 10.3389/fpls.2021.699618.

GUPTA, R.; KUMARI, A.; SHARMA, S.; ALZHRANI, M. O.; NOURELDEEN, A.; DARWISH, H. Identification, characterization and optimization of phosphate solubilizing rhizobacteria (PSRB) from rice rhizosphere. **Saudi Journal of Biological Sciences**, 2022. 35-42 p. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.09.075>.

HINSINGER, P.; HERRMANN, L.; LESUEUR, D.; ROBIN, A.; TRAP, J.; WAITHAISONG, K.; PLASSARD, C. Impact of roots, microorganisms and microfauna on the fate of soil phosphorus in the rhizosphere. **Annual Plant Reviews**, 2015. 375-407 p. doi: 10.1002/9781118958841.ch13.

JORHI, A. K.; OELMÜLLER, R.; DUA, M.; YADAV, V.; KUMAR, M.; TUTEJA, N.; VARMA, A.; BONFANTE, P.; PERSSON, B. L.; STROUD, R. M. Fungal association and utilization of phosphate by plants: success, limitations, and future prospects. **Frontiers in Microbiology**, 2015. 6 p. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00984>.

KARVANI, Z. E.; ESFAHANI, Z. C. Phosphorus solubilization: Mechanisms, recent advancement and future challenge. In: **YADAV, A. N. (eds) Soil microbiomes for sustainable agriculture**. Sustainable Development and Biodiversity, 27. Springer, Cham, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-73507-4_4.

KAISER, C.; KILBURN, M. R.; CLODE, P. L.; FUCHSLUEGER, L.; KORANDA, M.; CLIFF, J. B.; SOLAIMAN, Z. M.; MURPHY, D. V. Exploring the transfer of recent plant photosynthates to soil microbes: mycorrhizal pathway vs direct root exudation. **New Phytologist**, 205, 1537–1551, 2015.

KAUR, G.; REDDY, M. S. Influence of P-solubilizing bacteria on crop yield and soil fertility at multilocational sites. **European Journal of Soil Biology**, 2014. 35-40 p.

KHAN, M. S.; ZAIDI, A.; AHMAD, M.; OVES, M.; WANI, P. A. Plant growth promotion by phosphate solubilizing fungi-current perspective. **Archives of Agronomy and Soil Science**, 2010. 73–98 p. DOI 10.1080/03650340902806469.

LIANG, X.; JIN, Y.; HE, M.; LIU, Y.; HUA, G.; WANG, S. Composition of phosphorus species and phosphatase activities in a paddy soil treated with manure at varying rates. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 2017. 173–180 p.

MERINO, A.; JIMÉNEZ, E.; FERNÁNDEZ, C.; FONTÚRBEL, M. T.; CAMPO, J.; VEGA, J. A. Soil organic matter and phosphorus dynamics after low intensity prescribed burning in forests and shrubland. **Journal Environmental Management**, 2019. 214–225 p. DOI 10.1016/j.jenvman.2018.12.055.

PANTANO, G.; GROSSELI, G. M.; MOZETO, A. A.; FADINI, P. S. Sustainability in phosphorus use: a question of water and food security. *Química Nova*, 2016. 732–740 p.

PRIMVESI, A. **Manejo ecológico de solo: a agricultura em regiões tropicais**. Cotia, SP. Brasil Franchising, 2021.

RAWAT, P.; DAS, S.; SHANKHDHART, D.; SHANKHDHAR, S. C. Phosphate-solubilizing microorganisms: mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 2020. 49–68 p.

RITA, J. C. O.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; ZAIA, F. C.; NUNES, D. A. D. Mineralization of organic phosphorus in soil size fractions under different vegetation covers in the north of Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, 2013. 1207–1215 p.

SHARMA, S. B.; SAYYED, R. Z.; TRIVEDI, M. H.; GOBI, T. A. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. **Springerplus**, 2013. 587–600 p. DOI 10.1186/2193-1801-2-587.

SHRIVASTAVA, M.; SRIVASTAVA, P. C.; D'SOUZA, S. F. Phosphate-solubilizing microbes: diversity and phosphates solubilization mechanism. In: **MEENA, V.** (ed.) Role of rhizospheric microbes in soil. Springer, Singapore, 2018. p. 1–12. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0044-8_5.

SANTOS, H. C.; OLIVEIRA, F. H. T.; SOUZA, A. P.; SALCEDO, I. H.; SILVA, V. D. M. Disponibilidade de fósforo em função do seu tempo de contato com diferentes solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2016. 996–1001 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre, 2017. 6 ed. Artmed.

UPRETI, K.; MAITI, K.; RIVERA-MONROY, V. H. Microbial mediated sedimentary phosphorus mobilization in emerging and eroding wetlands of coastal Louisiana. **Science of the Total Environment**, 2019. 122–133. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.031.

VILAR, C. C.; MOREIRA-VILAR, F. C. Artigo de Revisão - comportamento do fósforo em solo e planta - phosphorus behavior in soil and plant. Campo Digital: **Revista Ciências Exatas e da Terra e Ciências Agrárias**, 2013. 37 - 44

YAN, Z. J.; CHEN, S.; LI, J. L.; ALVA, A.; CHEN, Q. Manure and nitrogen application enhances soil phosphorus mobility in calcareous soil in greenhouses. **Journal of Environmental Management**, 2016. 26–35 p.

ZHU, J.; LI, M.; WHELAN, M. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. **Science of the Total Environment**, 2018. 522–537p.

CAPÍTULO 5

PRODUÇÃO E CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS DE CULTIVARES DE CAPIM ELEFANTE (*Pennisetum purpureum* SCHUM.), COM E SEM ADUBAÇÃO, NO PERÍODO DAS ÁGUAS, NO RECÔNCAVO DA BAHIA

*PRODUCTION AND AGRONOMIC CHARACTERISTICS OF ELEPHANT GRASS CULTIVARS (*Pennisetum purpureum* SCHUM.), WITH AND WITHOUT FERTILIZATION, DURING THE RAINY SEASON IN THE RECÔNCAVO OF BAHIA*

DOI: <https://doi.org/10.56001/24.9786500981315.05>

Submetido em: 23/10/2024

Revisado em: 01/11/2024

Publicado em: 05/11/2024

Sandra Selma Marques de Souza

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Doutoranda em Ciências Agrárias,
UFRB, Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/8063376631228461>

Leone Ricardo de Carvalho Santana

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Doutorando em Ciências Agrárias,
UFRB, Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/5275047496672301>

Bruno Augusto Gama dos Santos

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Departamento de Ciências Agrárias,
UFRB, Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/5036901529397353>

Luísa Correia Oliveira

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Mestranda em Ciências Agrárias, UFRB,

Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/6974254694442761>

Damiana Amancio de Souza

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Mestre em Ciências Agrárias, UFRB,

Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/4924641421179266>

Luiz Edmundo Cincura de Andrade Sobrinho

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Doutorando em Ciências Agrárias,

UFRB, Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/8521549955215670>

Jamile Maria Oliveira do Nascimento Vieira

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Doutoranda em Ciências Agrárias,

UFRB, Cruz das Almas – BA

<https://lattes.cnpq.br/1921842141023873>

Raissa Homem Gonçalves

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Doutoranda em Ciências Agrárias,

UFRB, Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/3793210498543635>

Ossival Lolato Ribeiro

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Dr. Prof. Adjunto, UFRB, Cruz

das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/1497977439998897>

Emellinne Ingrid de Sousa Costa

Bolsista de Pós-Doutorado em Fitopatologia pela Embrapa Mandioca e Fruticultura -

Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/3432137040720301>

Resumo

Objetivou-se com o presente estudo avaliar a produção e as características agronômicas dos cultivares do capim Elefante BRS Capiacu, Roxo e Napier, com e sem adubação, aos 70 dias pós rebrotação, no período das águas. O modelo experimental foi o delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial 3 x 2, sendo as três cultivares de capim e dois níveis de adubação (sem adubação e com adubação). Foram avaliadas as variáveis: MS, ALT, DENS, PMS, PMV, FOL, COL, MOR, RFC. Os dados foram submetidos a análise de variância e as medias comparadas pelo teste Tukey a 5% de significância. Na avaliação individual observou-se melhores resultados com o incremento da adubação para as variáveis MS, ALT para cv. Capiacu e Napier, no entanto houve o aumento na proporção de COL. A ausência da adubação

proporcionou aumento significativo na RFC do capim Napier. Para o cv. Roxo, nenhuma variável apresentou diferença significativa. Ao comparar de forma geral, a adubação proporcionou aumento de MS para cv. Napier, para o cv. Roxo ALT, e para o Capiacu DENS. Para a parte não adubada do experimento observou-se a redução de COL, aumentando a RFC do cv. Napier. Conclui-se que com relação a avaliação individual, a prática da adubação proporcionou maior produção e melhores características agronômicas para o Capiacu e o Napier. Considerando cultivares X adubações, o Capiacu adubado destacou-se em relação a produção, ao passo que o Napier sem adubação se destacou em relação as características agronômicas, se mostrando mais promissoras que a cultivar Roxo, independente da adubação.

Palavras-chave: Eficiência produtiva; Forragicultura; Manejo de capineira.

Abstract

The present study aimed to evaluate the production and agronomic characteristics of the elephant grass cultivars BRS Capiacu, Roxo, and Napier, with and without fertilization, at 70 days post-regrowth, during the rainy season. The experimental model was a randomized block design in a 3 x 2 factorial scheme, consisting of the three grass cultivars and two fertilization levels (without and with fertilization). The variables evaluated were: DM, HT, DEN, SDM, LDM, LEA, ST, MOR, LRF. The data were subjected to analysis of variance, and the means were compared using Tukey's test at a 5% significance level. In the individual evaluation, better results were observed with fertilization for the variables DM and HT for the Capiacu and Napier cultivars; however, there was an increase in the proportion of ST. The absence of fertilization led to a significant increase in LRF in the Napier grass. For the Roxo cultivar, no variable showed significant differences. In the overall comparison, fertilization resulted in an increase in DM for Napier, in HT for Roxo, and in DEN for Capiacu. In the unfertilized part of the experiment, a reduction in ST was observed, increasing LRF in the Napier cultivar. It is concluded that, regarding individual evaluation, the practice of fertilization provided greater production and better agronomic characteristics for Capiacu and Napier. Considering cultivars x fertilization, fertilized Capiacu stood out in terms of production, while unfertilized Napier stood out in terms of agronomic characteristics, proving more promising than the Roxo cultivar, regardless of fertilization.

Keywords: Productive efficiency; Forage production; Grassland management.

Introdução

O capim Elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) é amplamente cultivado no Brasil por sua alta produtividade, vigor e facilidade de implantação, sendo usado como forragem conservada em silagem, verde picado e também indicado para pastejo (Figueira *et al.*, 2015). Desde 1991, a Embrapa Gado de Leite desenvolve cultivares com características específicas para corte e pastejo, como a BRS Capiacu, cv. Roxo e Napier, que se destacam na nutrição animal (Ledo, 2021).

A cultivar BRS Capiacu, por exemplo, é conhecida por sua resistência ao tombamento e facilidade de colheita mecanizada, apresentando touceiras densas e eretas (Pereira *et al.*, 2016). Já o capim Elefante cv. Roxo tem alta produção de forragem e resiste bem a condições climáticas adversas. No entanto, ainda há desafios quanto à melhoria do valor nutricional e da qualidade da fermentação da silagem, devido à alta umidade do material que pode levar a perdas no processo de ensilagem (Barcellos *et al.*, 2018).

O capim Napier se destaca por sua produtividade de matéria seca, com bom desempenho na maior parte do Brasil e floração entre abril e maio. É amplamente utilizado para corte, mas o interesse por seu uso em pastejo está crescendo, especialmente em vacas leiteiras, desde que o manejo mantenha a planta em uma altura adequada (Mota *et al.*, 2010).

Devido ao seu potencial produtivo e valor nutricional, o capim Elefante é uma excelente escolha de volumoso para a nutrição de ruminantes. No entanto, seu manejo adequado é crucial para garantir uma boa produtividade e longevidade, exigindo cuidados como a idade de corte e uma adubação balanceada do solo, especialmente com nutrientes como nitrogênio e potássio, que são essenciais para o crescimento da planta (Mistura, 2006). O nitrogênio, em particular, é um dos nutrientes que mais limitam a produção de massa seca por hectare (Saraiva; Konig, 2013), e sua eficácia depende do equilíbrio com outros nutrientes no solo (Costa *et al.*, 2006).

Essas práticas de manejo influenciam diretamente as características agronômicas desejáveis da planta, como a relação folha, que é importante para a digestibilidade da forragem (Oliveira, 2013). Também afetam a altura, peso de material verde e seco, e a proporção de material morto e matéria seca, fatores que determinam a qualidade da forragem disponível para os animais (Santos, 1997). O objetivo deste estudo é avaliar a produção e as características agronômicas das cultivares BRS Capiáçu, Roxo e Napier, com e sem adubação, aos 70 dias pós-rebrotação, durante o período das águas, no Recôncavo da Bahia.

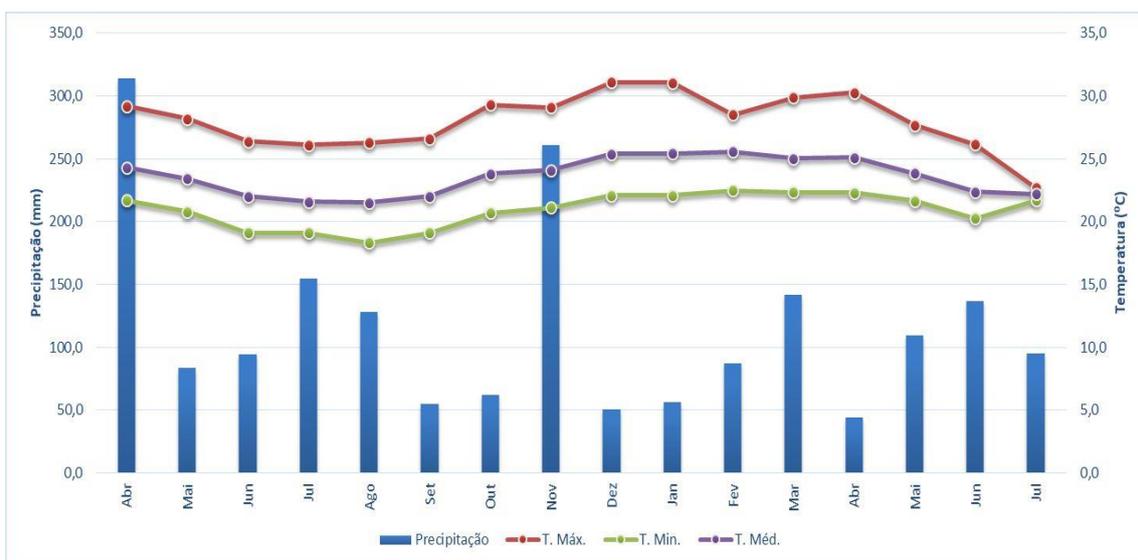
Metodologia

O experimento foi conduzido no Setor de Forragicultura do Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas (CCAAB) da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), no município de Cruz das Almas – BA, com coordenadas de latitude 12°41',11"S longitude 39°06'28"W e 226 m de altitude. A área utilizada para a realização do estudo já se encontrava estabelecida com as cultivares de capim Elefante desde agosto de 2021, no entanto, o período experimental ocorreu entre os meses de abril de 2023 a julho de 2023. A área experimental faz parte dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste do Brasil, sendo o solo predominante classificado como Latossolo Amarelo distrocoeso (Santos *et al.*, 2018).

De acordo com a classificação de Köppen, o clima é Am, quente e úmido (Koopman 1948), com temperatura média anual de 24,5°C, umidade média relativa do ar de 82% e

1170 mm de precipitação média anual concentrados entre os meses de março e agosto, enquanto de setembro a fevereiro há uma tendência de períodos prolongados de estiagem (Silva *et al.*, 2016). A tabela 1 mostra o balanço climático de temperatura e precipitação pluviométrica no período de abril de 2022 a julho de 2023.

Tabela 1: Balanço climático de temperatura e precipitação pluviométrica.



Precipitação mensal total (Prec.), temperaturas máximas (T.max.), média (T.med.) e mínima (T.min.) no período de abril de 2022 a julho de 2023, Cruz das Almas, BA. Dados obtidos pela Estação automática da Embrapa Fruticultura e Mandioca e Estação Agroclimatológica da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, em Cruz das Almas, BA.

O material vegetal é proveniente de mudas oriundas de propagação vegetativa, as quais foram plantadas em sucos e adubadas com esterco orgânico caprino (2,0 toneladas.ha- 1.ano-1) em agosto de 2021. Os cultivares (BRS Capiaçú, capim Elefante cv. Roxo e capim Elefante cv. Napier) foram estabelecidos em área de 88,2 m² (4,9 x 18 m – largura x comprimento), correspondente a sete linhas de plantio com espaçamento de 0,7m nas entrelinhas. Cada área de cultivo foi subdividida em dois blocos/parcelas de 44,1 m² (4,9 x 9 m – largura x comprimento), sendo um bloco/parcela adubado e outro sem adubação.

No dia 08 de abril de 2023, a área experimental foi subdividida em duas partes utilizando linha de náilon para a delimitação das linhas que receberiam ou não a adubação química, sendo a adubação realizada nesse mesmo dia. A adubação foi realizada com base na recomendação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA Gado de leite (EMBRAPA, 2016) que orienta a aplicação fracionada de 1.200 kg/ha/ano da

formulação NPK (20-05-20), após cada corte, sempre com o solo úmido. Dado exposto estimou-se a adubação para a área experimental já supracitada, sendo a mesma aplicada integralmente. Posteriormente, no dia 13 de maio de 2023 foi realizado o corte de uniformização das cultivares na altura média de 0,2 m em relação ao solo. O material cortado foi igualmente distribuído entre as linhas de plantio para fim de cobertura do solo.

A coleta foi realizada no dia 22 de julho de 2023 ao completar 70 dias pós corte de uniformização. Seis amostras para cada cultivar foram coletadas, onde três dessas eram referentes a parte da parcela que recebeu a adubação química, e as outros três referentes ao tratamento controle, ou seja, sem adubação, somando um total de dezoito amostras. Os pontos de coleta foram escolhidos ao acaso, de forma que a amostra fosse representativa. Cada ponto amostrado continha 1,0 m linear da linha de capim, onde era realizada a medição da altura das plantas relacionado a área em questão e em seguida era realizado o corte das plantas dentro de cada ponto escolhido. Após o corte determinou-se a produção de massa verde total de cada uma das amostras através da pesagem. Posteriormente, as amostras pesadas foram subdivididas em duas subamostras para ser realizadas as avaliações descritas a seguir:

- 1) Produção total de massa verde (PMV): a partir da primeira subamostra, com a massa, calculou-se uma estimativa de produção de massa verde por hectare (t. ha⁻¹), com base na multiplicação do valor obtido pela área de um hectare (10.000 m²) e razão pela área de coleta (0,7 m²).
- 2) Produção total de massa seca (PMS): a segunda subamostra foi pesada e colocada em estufa de circulação de ar forçada, em temperatura de 55 °C por 72 horas ou até apresentar uniformidade em relação ao peso, para determinação do teor de matéria seca (MS) da amostra. De posse do teor de MS, multiplicou-se pela PMV, para determinar a PMS por hectare (t. ha⁻¹).
- 3) Composição morfológica e Razão Folha: Colmo: na segunda subamostra, fez-se a separação física das frações lâmina foliar (g.Kg⁻¹), colmo + bainha (g.Kg⁻¹) e material morto (g.Kg⁻¹), para mensurar as porcentagens destas frações na composição morfológica dos capins estudados. Após a obtenção das proporções citadas, realizou-se a divisão da fração lâmina foliar pela fração colmo + bainha para a determinação da Razão Folha: Colmo (Kg.Kg⁻¹).
- 4) Altura de Plantas e Densidade da Forragem: em cada ponto de coleta das amostras, foi medido a altura média das plantas dentro de cada metro linear de coleta. De posse da altura média das plantas, bem como da estimativa de produção

de massa seca por hectare (Kg.cm^{-1}), realizou-se a divisão da massa seca pela altura, obtendo-se a densidade da forragem para cada local de coleta.

O modelo experimental utilizado foi o delineamento em blocos casualizados (DBC), em esquema fatorial 3 x 2, sendo três cultivares de capim Elefante (BRS Capiáçu, capim Elefante cv. Roxo e capim Elefante cv. Napier), e dois níveis de adubação.

Para avaliar o efeito das adubações sobre as características produtivas das cultivares de capim Elefante e a comparação entre as cultivares, os dados foram analisados, seguindo o modelo: $Y_{ij} = m + b_j + t_i + e_{ij}$. Onde: Y_{ij} é o valor observado da característica estudada, no tratamento i ($i = 1, 2, \dots, I$) e no bloco (ou repetição) j ($j = 1, 2, \dots, J$); m é a média geral (de todas as observações) do experimento; t_i é o efeito do tratamento i ; e_{ij} é o erro associado à observação y_{ij} ou efeito dos fatores não-controlados sobre ela.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste Tukey a nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$), utilizando o comando PROC GLM do pacote estatístico SAS (Statistical Analysis System, 2015).

Resultados e Discussão

Os resultados referentes a produção agrônômica e características morfológicas das cultivares de capim Elefante sob diferentes adubações, avaliadas aos 70 dias após o corte de uniformização estão apresentadas nas Tabelas abaixo.

Na Tabela 2 foi observado efeito significativo ($p \leq 0,05$) apenas para as variáveis MS, ALT e COL. O aumento de MS com o incremento da adubação pode ser explicado pela ação do nitrogênio como fator controlador dos diferentes processos de crescimento e desenvolvimento das plantas, proporcionando aumento de produção pela fixação de carbono (Martuscello *et al.*, 2006).

Tabela 2. Produção agrônômica do capim Elefante cv. Capiaçú, com e sem adubação, aos 70 dias após rebrotação.

Item	Capim Elefante cv. Capiaçú		CV ¹	Valor d P
	Com Adubação	Sem Adubação		
Matéria Seca	14,13a	12,75b	3,51	0,0235
Altura (cm)	175,66a	101,33b	7,44	0,0009
Densidade (cm ²)	626,8	304,6	31,78	0,0560
Prod. Matéria Seca	12206	4049	89,30	0,2407
Prod. Matéria verde	65471	31643	67,68	0,2760
Folhas (%)	42,85	3,19	23,80	0,2176
Colmo (%)	54,21a	50,00b	1,85	0,0060
Material morto (%)	13,59	7,14	87,04	0,4307
Razão F:C	0,59	0,85	24,55	0,1489

¹CV: Coeficiente de variação; * Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas, não diferem entre si, pelo teste Tukey, para $p \leq 0,05$.

A relação entre o aumento da MS e a proporção crescente de colmos em uma cultura forrageira é um aspecto relevante para a compreensão da produção de forragem. A literatura evidencia que o incremento na proporção de colmos está associado diretamente ao aumento da produção de MS (Junqueira 2015). É fundamental destacar que essa modificação na estrutura do dossel, embora possa potencializar a produção de MS, pode acarretar efeitos adversos na qualidade da forragem, especificamente, a elevação da proporção de colmos resulta em uma redução na relação folha:colmo. Esse parâmetro é crucial, pois está intimamente ligado ao desempenho dos animais que consomem essa forragem (Euclides *et al.*, 2000).

O aumento de COL pode influenciar negativamente a qualidade da forragem, impactando diretamente na digestibilidade e no teor de nutrientes disponíveis para os animais. Estudos realizados por Euclides *et al.* (2000) destacam a importância de se considerar essa relação, pois ela pode afetar significativamente a eficiência alimentar e o ganho de peso dos animais. Nesse contexto, é crucial ressaltar que o interesse principal reside na maximização da porcentagem de lâminas foliares. Isso não apenas favorece a produção de MS, mas também melhora substancialmente o valor nutritivo da forragem, uma vez que lâminas foliares apresentam, em geral, uma composição mais rica em nutrientes, contribuindo para uma dieta mais balanceada e, conseqüentemente, para o melhor desempenho animal (Machado 2008).

A variável ALT é um fator de grande importância no manejo de gramíneas, uma vez que está relacionada ao grau de avanço da maturidade fisiológica das plantas, além de ter relação direta com a qualidade da forragem (Pinho *et al.*, 2013). No âmbito desta pesquisa, destaca-se que o Capiacu submetido à adubação apresentou uma expressiva altura média de 175,66 cm, em comparação aos 101,33 cm observados na condição sem adubação. Essa disparidade significativa ressalta a notável eficiência da prática de adubação, uma vez que os valores alcançados se aproximam mais dos padrões recomendados para a realização do corte. Segundo Ferreira (2015) não existem estudos científicos que definam a altura ideal, no entanto, é tradicionalmente recomendado que o capim Elefante cv. Capiacu seja cortado quando atingir 180 cm de altura durante o período chuvoso, ou 150 cm durante a época de seca.

Tais resultados corroboram com diversas evidências científicas que atestam a influência positiva da adubação no desenvolvimento vegetativo de culturas forrageiras, como o Capiacu. Estudos anteriores, como o conduzido por (Qadros *et al.*, 2002; PacilloLLO *et al.*, 2003; Fagundes *et al.*, 2005) mostraram a eficiência e o efeito da adubação e demonstraram que a aplicação adequada de nutrientes, especialmente nitrogênio, fósforo e potássio, desempenha um papel crucial no estímulo ao crescimento e na melhoria da qualidade das plantas forrageiras.

Para o capim Elefante cv. Roxo (Tabela 3) foi observado que para todas as variáveis não houve diferença estatística significativa ($p \leq 0,05$), apenas diferenças para números absolutos.

Tabela 3. Produção agrônômica do capim Elefante cv. Roxo, com e sem adubação, aos 70 dias após rebrotação.

Item	Capim Elefante cv. Roxo		CV ¹	Valor de P
	Com Adubação	Sem Adubação		
Matéria Seca	15,56	15,18	6,41	0,6587
Altura (cm)	215,33	181,33	10,01	0,1042
Densidade (cm ²)	337,19	302,32	27,14	0,6484
Prod. Matéria Seca	9849	9219	18,24	0,6800
Prod. Matéria verde	63690	60857	20,41	0,7984
Folhas (%)	37,66	35,73	14,15	0,6726
Colmo (%)	62,34	62,18	10,03	0,9775
Material morto (%)	0	2,08	244,94	0,3739
Razão F:C	0,62	0,58	24,26	0,7534

¹CV: Coeficiente de variação; * Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas, não diferem entre si, pelo teste Tukey, para $p \leq 0,05$.

Com a aplicação da adubação para o capim Elefante cv. Napier (Tabela 4), verificou-se que houve efeito significativo ($p \leq 0,05$), para MS, ALT, COL e RFC, é notório que houve aumento considerável na altura do capim Napier, cerca de 88 cm em relação ao não adubado.

Tabela 4. Produção agrônômica do capim Elefante cv. Napier, com e sem adubação, aos 70 dias após rebrotação.

Item	Capim Elefante cv. Napier		CV ²	Valor de P
	Com Adubação	Sem Adubação		
Matéria Seca	18,32a	14,75b	8,36	0,0341
Altura (cm)	207,33a	122,00b	9,20	0,0023
Densidade (cm ²)	240,6	256,0	64,65	0,9124
Prod. Matéria Seca	9048	5022	47,28	0,2124
Prod. Matéria verde	49190	32024	50,07	0,3596
Folhas (%)	30,90	39,08	15,58	0,1402
Colmo (%)	63,54a	42,31b	12,69	0,0180
Material morto (%)	5,55	18,59	59,84	0,0917
Razão F:C	0,49b	0,94a	27,80	0,0495

¹CV: Coeficiente de variação; * Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas, não diferem entre si, pelo teste Tukey, para $p \leq 0,05$.

O capim Elefante cv. Napier demonstrou uma resposta significativamente superior à adubação, apresentando um teor de matéria seca (MS) de 18,32%, conforme evidenciado na Tabela 3. No entanto, é importante observar que, está cultivar exibe um teor relativamente baixo de MS para ensilagem. Essa condição está distante do ideal preconizado para silagens, que varia entre 28% e 34%. Uma alternativa para aumentar o teor de MS e carboidratos solúveis da silagem, a fim de otimizar a fermentação láctica, que é a desejável para obtenção de uma boa silagem, é a utilização de algum aditivo sequestrante de umidade (Retore *et al.*, 2020).

Martuscello *et al.* (2009) ressalta a notável influência das condições edafoclimáticas e, particularmente, do sombreamento nas características estruturais das plantas, resultando em adaptações que podem ser tanto positivas quanto negativas. Essa observação ganha relevância ao considerar o expressivo aumento na proporção de COL e a correspondente diminuição na relação RFC.

O aumento da proporção de colmos desencadeia a redução da RFC, resultando em uma diminuição do conteúdo celular da planta forrageira. Esse fenômeno, corroborado por Monção *et al.* (2019), destaca a interconexão entre fatores genéticos intrínsecos à

planta e estratégias adaptativas. Essas estratégias podem incluir a elevação dos colmos e a exposição mais efetiva das folhas para otimizar a interceptação luminosa, impulsionando, assim, a eficiência fotossintética global da planta.

O estudo de Monção *et al.* (2019) acentua que a elevação dos colmos, em resposta a fatores genéticos e adaptações à luz, não apenas modifica a estrutura da planta, mas também influencia diretamente na sua qualidade nutricional. A redução da RFC, conseqüentemente, pode comprometer o valor nutritivo da planta forrageira, impactando a alimentação consumida pelos animais.

Quanto às três cultivares de capim Elefante analisadas, os resultados indicam que não foram observadas diferenças estatisticamente significativas para as variáveis PMS, PMV e FOL, conforme apresentado na Tabela 4. Esse resultado sugere uma uniformidade relativa nessas variáveis entre as cultivares, destacando a necessidade de análises mais detalhadas para compreender as nuances das respostas das plantas a diferentes condições ambientais e genéticas.

Tabela 5. Produção agrônômica de cultivares de capim Elefante, com e sem adubação, aos 70 dias após rebrotação.

Item	Cultivares de capim Elefante						CV ¹	Valor de P
	Capiapu(A1)	Roxo (A1)	Napier (A1)	Capiapu(A2)	Roxo (A2)	Napier (A2)		
Matéria Seca	14,13bc	15,56b	18,32 ^a	12,75c	15,18b	14,75b	6,73	0,0006
Altura (cm)	175,67c	215,33a	207,33ab	101,33d	181,33bc	122,00d	9,33	<0,0001
Densidade (cm ²)	626,8a	337,2b	240,6b	304,6b	302,3b	256,0b	39,42	0,0416
Prod. Matéria Seca	12206	9849	9048	4049	9219	5022	57,30	0,3307
Prod. Matéria verde	65471	63690	49190	31643	60857	32024	46,53	0,3235
Folhas (%)	42,85	37,66	30,90	32,19	35,73	39,08	18,53	0,3259
Colmo (%)	54,21ab	62,34a	63,54 ^a	50,00bc	62,18a	42,31c	9,55	0,0019
Material morto (%)	13,59ab	0c	5,55abc	7,14abc	2,08bc	18,58a	87,32	0,0459
Razão F:C	0,59bc	0,62abc	0,49c	0,85ab	0,58bc	0,94a	25,81	0,0526

¹CV: Coeficiente de variação; * Médias seguidas pela mesma letra minúscula, nas linhas não diferem entre si, pelo teste Tukey, para $p \leq 0,05$. A1: Com adubação; A2: Sem adubação.

Nos três cultivares estudados, nas duas condições de adubação, o teor de MS encontra-se abaixo do considerado ideal (30%) para a produção de silagem, evidenciando que a utilização dessas variedades como fonte de forragem para a produção de silagem demandará técnicas de manejo e/ou o uso de aditivos que controlem o excesso de umidade dentro do silo e promovam uma fermentação adequada (Costa *et al.*, 2023).

Para a variável ALT, o capim Roxo foi a cultivar que atingiu maior altura tanto o adubado como o não adubado, ao passo que houve aumento da proporção de COL também. O resultado em questão pode ser interpretado como uma característica comum das plantas forrageiras quando crescem livremente (sem pastejo), uma vez que, de acordo com Pereira *et al.*, (2014) com a maturação e crescimento da planta, no interior do dossel forrageiro ocorre maior sombreamento o que resulta em competição por luz entre os perfilhos. Isso, por sua vez, leva ao alongamento do colmo em detrimento das folhas.

Quanto a DENS, foi observado que houve diferença estatística significativa apenas para o Capiapu adubado. Em relação aos demais tratamentos, não foi observada diferença estatística. Esse resultado sugere a eficiência dessa cultivar responder a adubação em termos de produção por área, demonstrando que o cv. BRS Capiapu apresenta-se como boa opção de alimento volumoso para a alimentação e nutrição animal.

Em relação a porcentagem de MOR, a menor média encontrada foi para o capim Roxo adubado, se destacando em relação aos demais. Essa é uma característica desejável, nesse contexto, a importância de se conhecer a contribuição de material morto e verde da pastagem deve-se a influência que estas características exercem sobre a quantidade de material disponível para a alimentação e, conseqüentemente, o desempenho animal.

No que diz respeito a RFC, o capim Napier não adubado apresentou os melhores resultados, obtendo maior média, o que é interessante para a produção animal, pois a maior proporção de folhas em relação ao colmo promove aumento do valor nutritivo da forragem, visto que a maior concentração de proteína bruta e digestibilidade se encontra nas folhas (Queiroz *et al.*, 2000).

Assim, ao considerar a relação a RFC é possível otimizar a produção de forragem não apenas em termos de quantidade, mas também garantindo uma qualidade nutricional adequada para atender às necessidades dos animais. Essas considerações são essenciais para a gestão eficaz de pastagens e sistemas de produção animal.

Conclusão

Com relação à avaliação individual dos cultivares de capim Elefante, conclui-se que o uso da adubação proporcionou maior produção e melhores características agronômicas para o Capiapu e o Napier.

De forma geral (cultivares X adubações), o Capiapu adubado destacou-se em relação a produção, ao passo que o Napier sem adubação se destacou em relação as

características agronômicas, se mostrando mais promissoras que a cultivar Roxo, independente da adubação.

Referências

- BARCELOS, A.F.; CARVALHO, J.R.R.; TAVARES, V.B.; GONÇALVES, C.C.M. Valor nutritivo e características fermentativas da silagem de Capim-Elefante com diferentes proporções de casca de café. **Ciência Animal Brasileira**, 2018. 19 p.
- COSTA, E.I.S.; SOUZA, M.G.; PIRES, N.J.S.; GONÇALVES, R.H.; SANTOS, I.E.D.; RIBEIRO, O.L. Produção e caracterização botânica de cultivares de capim-elefante, em diferentes estádios de desenvolvimento, no período das águas. In: XI Simpósio Brasileiro de Agropecuária Sustentável (SIMBRAS) e VIII Congresso Internacional de Agropecuária Sustentável, 2023, Evento Online. **Anais: Os novos objetivos de desenvolvimento sustentável em nível global, 2023**.
- COSTA, N.L.; MAGALHÃES, J.A.; PEREIRA, R.G.A.; TOWNSEND, C.R. Efeito de regimes de resíduos sobre a produção e qualidade da forragem de capim-elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum cv. Mott). **Revista Científica Rural**, 2006. 11 p.
- EUCLIDES, V.P.B.; CARDOSO, E.G.; MACEDO, M.C.M.; OLIVEIRA, M.P. Consumo voluntário de *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk e *Brachiaria brizantha* cv. Marandu sob pastejo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 2000. 29 p.
- FAGUNDES, J.L.; FONSECA, D.M.; GOMIDE, J.A.; NASCIMENTO Jr., D.; VITOR, C.M.T.; MORAIS, R.V.; MISTURA, C.; REIS, G.C.; MARTUSCELLO, J.A. Acúmulo de forragem em pastos de *Brachiaria decumbens* adubados com nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 2005. 40 p.
- FERREIRA, E.A. **Idades de corte do capim-elefante BRS Canará para produção de forragem e feno picado**. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical), Universidade Federal de Mato Grosso, 2015. 14 p.
- FIGUEIRA, D.N.; NEUMANN, M.; UENO, R.K.; MULLER, M.M.L.; FARIA, M.V. Production and composition of chemical elephant grass cv. pioneer in different heights of waste: literature review. **Applied Research and Agrotechnology**, 2015. 8 p.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos**. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 19 set. 2023.
- JUNQUEIRA, J.B. **Aplicação de biofertilizante, composto e uréia na produção de capim tanzânia (*Panicum maximum*, Jacq.) sob irrigação**. Tese (Doutorado), Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2015. 80 p.
- KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der Erde*. Gotha: **Verlag Justus Perthes**, 1948.
- LEAL, V.N. **Desempenho de cultivares e épocas de corte de capim-Elefante irrigado em Ceres (GO)**. Dissertação (Mestrado em Irrigação no Cerrado), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Ceres, 2019. 70 p.

PEREIRA, A.V.; AUAD, A.M.; BRIGHENTI, A.M.; MITTELMANN, A.; GOMIDE, C.A.M.; MARTINS, C.E.; PACIULLO, D.S.C.; LEDO, F.J.S.; OLIVEIRA, J.S.E.; LEITE, J.L.B.; MACHADO, J.C.; MATOS, L.L.; MORENZ, M.J.F.; ANDRADE, P.J.M.; BENDER, S.E.; ROCHA, W.S.D. **BRS Capiaçú e BRS Kurumi: cultivo e uso**. Brasília, DF: Embrapa, 2021.

LOPES, R.S.; FONSECA, D.M.; NASCIMENTO Jr., D.; OLIVEIRA, R.A.; ANDRADE, A.C.; MASCARENHAS, A.G. Efeito da irrigação e adubação na disponibilidade e composição bromatológica da massa seca de lâminas foliares de capim-elefante. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 2005. 34 p.

MACHADO, P.A.S.; VALADARES FILHO, S.C.; VALADARES, R.F.D.; DETMANN, E.; PAIXÃO, M.L.; PINA, D.S. Avaliação nutricional do capim-elefante (Cameroon) em diferentes idades de rebrotação. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 2008. 37 p.

MARTUSCELLO, J.A.; FONSECA, D.M.; NASCIMENTO Jr., D.; SANTOS, P.M.; CUNHA, D.N.F.V. Características morfogênicas e estruturais de capim massai submetido a adubação nitrogenada e desfolhação. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 2006. 35 p.

MISTURA, C.; FAGUNDES, J.L.; FONSECA, D.M.; MOREIRA, L.M.; VITOR, C.M.T.; JUNIOR, D.N.; JUNIOR, J.I.R. Disponibilidade e qualidade do capim elefante com e sem irrigação adubado com nitrogênio e potássio na estação seca. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 2006. 35 p.

MONÇÃO, F.P.; COSTA, M.A.M.S.; SAMPAIO, J.P.; GOMES, M.; LEAL, D.B.; MARANHÃO, C.M.A.; CHAMONE, J.M.A. Yield and nutritional value of BRS Capiaçú grass at different growth ages. **Semina: Ciências Agrárias**, 2019. 40 p.

MOTA, V.J.G.; REIS, S.T.; SALES, E.C.J.; ROCHA JÚNIOR, V.R.; OLIVEIRA, F.G.; WALKER, S.F.; MARTINS, C.E.; CÓSER, A.C. Lâminas de irrigação e doses de nitrogênio em pastagem de capim-elefante no período seco do ano no norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 2010. 39 p.

OLIVEIRA, A.V.; DAHER, R.F.; MENEZES, B.R.S.; GRAVINA, G.A.; SOUSA, L.B.; GONÇALVES, A.C.S.; OLIVEIRA, M.L.F. Avaliação do desenvolvimento de 73 genótipos de capim-elefante em Campos dos Goytacazes-RJ. **Boletim da Indústria Animal**, 2013. 70 p.

OLIVEIRA, V.C. **Silagem de capim-elefante. Mato Grosso do Sul: GRAER/SEMAGRO, 2018**. Disponível em:

<https://www.pesquisa.agraer.ms.gov.br/wp-content/uploads/2018/08/Silagem-de-Capim-Elefante.pdf>. Acesso em: 21 set. 2023.

PACCIULLO, D.S.C.; DEREZ, F.; AROEIRA, L.J.M.; MORENZ, M.J.F.; VRENEQUE, R.S. Morfogênese e acúmulo de biomassa foliar em pastagem de capim-elefante avaliada em diferentes épocas do ano. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 2003. 38 p.

PEREIRA, L.E.T.; PAIVA, A.J.; GEREMIA, E.V.; SILVA, S.C. Components of herbage accumulation in elephant grass cvar Napier subjected to strategies of intermittent stocking management. **The Journal of Agricultural Science**, 2014. 152 p.

PEREIRA, A.V.; LEDO, F.J.S.; MORENZ, M.J.F.; LEITE, J.L.B.; SANTOS, A.M.B.; MARTINS, C.E.; MACHADO, J.C. **Brs Capiaçú: cultivar de capim-elefante de alto rendimento para produção de silagem**. Comunicado Técnico 79. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2016.

PINHO, R.M.A.; SANTOS, E.M.; BEZERRA, H.F.C.; OLIVEIRA, J.S.; CARVALHO, G.G.P.; CAMPOS, F.S.; PEREIRA, G.A.; CORREIA, R.M. Avaliação de fenos de capim-buffel colhido em diferentes alturas de corte. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, 2013. 14 p.

QUADROS, D.G.; RODRIGUES, L.R.A.; FAVORETTO, V.; MALHEIROS, E.B.; HERLING, V.R.; RAMOS, A.K.B. (2002). Componentes da Produção de forragem em Pastagem dos Capins Tanzânia e Mombaça Adubadas com Quatro doses de NPK. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 31, 1333-1342.

QUEIROZ FILHO, J.L.; SILVA, D.S.; NASCIMENTO, I.S. (2000). Produção de matéria seca e qualidade do Capim-Elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) cultivar Roxo em diferentes idades de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 29, 69-74.

RETORE, M.; ALVES, P.J.; ORRICO JUNIOR, A.P.; MENDES, S.S. (2020). Qualidade da silagem do capim-elefante BRS Capiaçú. **Comunicado técnico da Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados-MS**, 261, 10.

SANTOS, P.M. (1997). Estudos de características de *Panicum maximum* (Jacq.) cvs. Tanzânia e Mombaça para estabelecer seu manejo. 1997. 62 p. **Dissertação (Mestrado em agronomia)** - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; CUNHA, T. (2018). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. In: **EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Solos**, 530.

SARAIVA, V.M.; KONIG, A. Produtividade do capim elefante roxo irrigado com efluente doméstico tratado no semiárido potiguar e suas atividades. **Holos**, 2013.

SAS LEARNING EDITION. Getting started with the SAS Learning Edition. **Cary**, 2015. 200 p.

SILVA, T.S.; COELHO FILHO, M.A.; COELHO, E.F. (2016). **Boletim meteorológico da estação convencional de Cruz das Almas, BA: variabilidade e tendências climáticas**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 72.

VILELA, H. Pastagem: seleção de plantas forrageiras, implantação e adubação. Viçosa, MG: **Aprenda Fácil**, 2005.

CAPÍTULO 6

RECOMENDAÇÕES PARA IDADE DE CORTE EM CULTIVARES DE CAPIM-ELEFANTE (*Pennisetum purpureum* SCHUM.) NO PERÍODO DE SECA NO RECÔNCAVO DA BAHIA

*RECOMMENDATIONS FOR CUTTING AGE IN ELEPHANT GRASS CULTIVARS (*Pennisetum purpureum* SCHUM.) DURING THE DRY SEASON IN THE RECÔNCAVO OF BAHIA*

DOI: <https://doi.org/10.56001/24.9786500981315.06>

Submetido em: 23/10/2024

Revisado em: 01/11/2024

Publicado em: 05/11/2024

Leone Ricardo de Carvalho Santana

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Doutorando em Ciências Agrárias,
UFRB, Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/5275047496672301>

Bruno Augusto Gama dos Santos

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Departamento de Ciências Agrárias,
UFRB, Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/5036901529397353>

Luísa Correia Oliveira

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Mestranda em Ciências Agrárias, UFRB,
Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/6974254694442761>

Sandra Selma Marques de Souza

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Doutoranda em Ciências Agrárias,
UFRB, Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/8063376631228461>

Damiana Amancio de Souza

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Mestre em Ciências Agrárias, UFRB,
Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/4924641421179266>

Luiz Edmundo Cincura de Andrade Sobrinho

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Doutorando em Ciências Agrárias,
UFRB, Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/8521549955215670>

Jamile Maria Oliveira do Nascimento Vieira

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Doutoranda em Ciências Agrárias,
UFRB, Cruz das Almas – BA

<https://lattes.cnpq.br/1921842141023873>

Raissa Homem Gonçalves

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Doutoranda em Ciências Agrárias,
UFRB, Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/3793210498543635>

Ossival Lolato Ribeiro

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Dr. Prof. Adjunto, UFRB, Cruz
das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/1497977439998897>

Emellinne Ingrid de Sousa Costa

Bolsista de Pós-Doutorado em Fitopatologia pela Embrapa Mandioca e Fruticultura -
Cruz das Almas – BA

<http://lattes.cnpq.br/3432137040720301>

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o crescimento e propor recomendação acerca do melhor período de realização de corte de três cultivares de capim-elefante em solo da região do Recôncavo Baiano no período de seca. O experimento foi realizado no setor de forragicultura do campus da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia no município de Cruz das Almas – BA, em área já estabelecida com as cultivares de capim-elefante, avaliadas durante o período considerado como de baixa pluviosidade para a região, entre os meses de outubro e dezembro de 2022. O modelo experimental utilizado foi o delineamento em blocos casualizados (DBC), em esquema fatorial 3 x 8, tendo-se como tratamentos os três cultivares de capim-elefante (BRS Capiacú, cv. Roxo e cv. Napier) e oito idades de corte (28, 35, 42, 49, 56, 63, 70 e 77 dias), nos quais foram avaliadas quanto a Produção Total de Massa Verde (PMV), Produção Total de Massa Seca (PMS), teor de Matéria Seca (MS), composição morfológica e Razão Folha: Colmo (RFC), Altura de

Plantas e Densidade da Forragem. Os dados encontrados foram submetidos a análise de variância e, quando significativos foram comparados pelo teste de Tukey a 5% de significância. Enquanto aos dados das idades de corte das gramíneas, além da ANOVA, foi realizada análise de regressão ($P < 0,05$). Quando comparadas as três cultivares de Capim Elefante, concluímos que a cultivar Elefante Roxo apresenta maior produção de folha do que as demais cultivares analisadas. A cultivar Elefante Capiçu, se destaca pela sua produção de colmo ser maior do que as demais cultivares. Ao observar os resultados das variáveis Razão Folha: Colmo e Densidade, a cultivar Elefante Capiçu apresenta qualidade superior as demais cultivares estudadas. Contudo, concluímos que para as cultivares Elefante Capiçu e Elefante Napier no período de seca, a idade de corte recomendada seria por volta dos 70 dias da rebrotação, onde os mesmos apresentaram estabilidade produtiva na PMS. Para a cultivar Elefante Roxo, conclui-se que sejam realizados mais estudos com maiores períodos de corte das forrageiras, pois o período de corte em 77 dias da rebrotação estabelecido nesse estudo não foi suficiente para expressar todo o potencial produtivo da cultivar.

Palavras-chave: Produção de forragem, Composição morfológica, Período de seca

Abstract

This work aims to evaluate the growth and propose a recommendation about the best period for cutting three cultivars of elephant grass in the soil of the Recôncavo Baiano region in the dry season. The experiment was carried out in the forage sector of the campus of the Federal University of Recôncavo da Bahia in the municipality of Cruz das Almas - BA, in an area already established with elephant grass cultivars, evaluated during the period considered as low rainfall for the region, between October and December 2022. The experimental model used was a randomized block design (RBD), in a 3 x 8 factorial scheme, with the three elephant grass cultivars (BRS Capiçu, cv. Roxo and Napier) and eight cutting ages (28, 35, 42, 49, 56, 63, 70 and 77 as treatments days), in which they were evaluated in terms of Total Green Mass Production (GMP) and Dry Mass Production (DMP), Dry Matter Content (DMC), Morphological Composition and Leaf: Stem Ratio (LSR), plant height and density of forage. The data found were submitted to analysis of variance and, when significant, were compared by Tukey's test at 5% significance. As for the data on cutting ages of grasses, in addition to ANOVA, regression analysis was performed ($P < 0.05$). When comparing the three cultivars of Elephant Grass, we conclude that the Cultivate Purple Elephant has a higher leaf production than the other cultivars analyzed. The cultivate Capiçu Elephant stands out for its stem production being higher than the other cultivars. When observing the results of the Leaf Ratio: Stem and Density variables, the cultivate Capiçu Elephant presents superior quality than the other studied cultivars. However, we concluded that for the cultivars Capiçu Elephant and Napier Elephant in the dry period, the recommended cutting age would be around 70 days from regrowth, where they presented productive stability in PMS. For the cultivar Elefante Roxo, it is concluded that more studies should be carried out with longer forage cutting periods, since the cutting period of 77 days from regrowth established in this study was not enough to express all the productive potential of the cultivate.

Keywords: Forage production, Morphological composition, Drought

Introdução

A crescente produção animal no Brasil enfrenta o desafio da baixa disponibilidade de forragem de alta qualidade nutricional. Isso ressalta a necessidade de otimizar a produção forrageira para melhorar o desempenho produtivo dos animais. Pinho *et al.* (2013) destacam que a qualidade da forragem é influenciada tanto pelo manejo da planta quanto pela maturidade fisiológica, sugerindo estudos sobre a altura e a composição morfológica da planta, fatores relacionados à qualidade da forragem.

O capim-elefante ocupa uma posição importante na pecuária brasileira, com alta produção de forragem e elevado valor nutricional, atingindo até 80 toneladas por hectare

ao ano (Lopes, 2004; Leal, 2019). No entanto, essa gramínea tropical apresenta sazonalidade significativa e variações nutricionais entre os períodos chuvosos e secos, bem como entre cultivares e regiões (Oliveira, 2018).

Figueira *et al.* (2015, apud Magalhães *et al.*, 2018) destacam o uso do capim-elefante como capineira, para pastejo e produção de silagem ou feno. Contudo, Magalhães *et al.* (2018) apontam que seu manejo exige cuidados, especialmente com a idade de corte e o fornecimento adequado de nutrientes, fatores que afetam a produtividade e o valor nutricional da forragem.

A produção e o valor nutricional do capim-elefante estão diretamente relacionados ao momento da colheita. Martins *et al.* (2020) afirmam que o avanço da maturação pode reduzir o consumo e a digestibilidade da forragem, impactando negativamente a alimentação animal.

O capim-elefante, de origem africana, foi introduzido no Brasil no início do século XX, sendo amplamente disseminado devido à sua excelente adaptação ao clima tropical (Lima *et al.*, 2010). Italiano *et al.* (2004) destacam que essa gramínea pode atingir três metros de altura, acumulando grande quantidade de matéria seca. Nas últimas duas décadas, novas cultivares foram lançadas, com uso voltado principalmente para a forragicultura (Oliveira, 2018).

Estudos sobre manejo e colheita ainda são necessários, considerando as variações entre cultivares e as condições edafoclimáticas de cada região (Martin, 1997; Oliveira, 2018; Leal, 2019). Lopes (2004) ressalta que o clima da região não pode ser modificado, e cada cultivar tem suas próprias adaptações. Este trabalho visa avaliar o crescimento e recomendar o período ideal de corte de três cultivares de capim-elefante no período de seca no Recôncavo Baiano.

Metodologia

O experimento foi conduzido no Setor de Forragicultura do Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, no município de Cruz das Almas – BA. A área utilizada para estudo já se encontrava estabelecida com as cultivares de capim-elefante desde agosto de 2021, sendo a avaliação das cultivares feita durante o período de outubro de 2022 a dezembro de 2022.

O modelo experimental utilizado foi o delineamento em blocos casualizados (DBC), em esquema fatorial 3 x 8, sendo três cultivares de capim-elefante (BRS Capiaçú,

Capim-elefante cv. Roxo e Capim-elefante cv. Napier) e oito idades de corte após a rebrotação (30, 37, 44, 51, 58, 65, 72 e 79 dias).

O material vegetal é proveniente de mudas oriundas de propagação vegetativa, as quais foram plantadas em sucos e adubadas com esterco orgânico de caprino (2,0 toneladas.ha-1.ano-1) em agosto de 2021. Cada cultivar se encontra estabelecida em área de 88,2 m² (4,9 x 18 m – largura x comprimento), correspondente a 7 linhas de plantio com espaçamento de 0,7m nas entrelinhas. Cada área de cultivo foi subdividida em três blocos de 29,4 m² (4,9 x 6 m – largura x comprimento).

As médias anuais para as variáveis de umidade relativa, temperatura e precipitação em torno de 81%, 23,9 °C e aproximadamente 1.130 mm, respectivamente. Considerando as datas de equinócios e solstícios de 2022 (22 de setembro a 21 de dezembro de 2022), o estudo foi realizado na estação de Primavera de 2022.

Para iniciar as avaliações, realizou-se o corte de uniformização na área contendo as três cultivares, cortando-se as plantas na altura de 0,20 m em relação ao solo, no dia 15 de setembro de 2022. A partir desta data, foram consideradas as datas de rebrota supracitadas para a coleta de amostras, conforme delineamento experimental.

Após 28 dias do corte de uniformização, iniciou-se a coleta das amostras, sendo 03 amostras para cada cultivar, em cada data de coleta (28, 35, 42, 49, 56, 63, 70 e 77 dias), totalizando 24 amostras. Os pontos de coleta foram ao acaso, sendo um ponto para cada bloco (subdivisão) da área total de cultivo, de forma que a amostra fosse representativa da situação momentânea dos capins, em cada data.

Em cada ponto foram seccionados 1,0 m linear da linha de capim e, considerando-se o espaçamento entre linhas de 0,7 m, adotou-se a área de amostragem de 0,7 m², sendo esta utilizada nas avaliações posteriores. Após a retirada das amostras, foram realizadas as pesagens e, posteriormente, a separação em duas subamostras para realização das avaliações descritas a seguir:

1) Produção total de massa verde (PMV): a partir da primeira subamostra, calculou-se uma estimativa de produção de massa verde por hectare (t. há¹), com base na multiplicação do valor obtido pela área de um hectare (10.000 m²) e razão pela área de coleta (0,7 m²).

2) Produção total de massa seca (PMS): a segunda subamostra, foi pesada e colocada em estufa de circulação de ar forçada, em temperatura de 55 °C por 72 horas, para determinação do teor de matéria seca (MS) da amostra. De posse do teor de MS, multiplicou-se pela PMV, para determinar a PMS por hectare (t. há¹).

3) Composição morfológica e Razão Folha: Colmo: ainda na primeira subamostra, fez-se a separação física das frações lâmina foliar (g. Kg¹), colmo + bainha (g. Kg¹) e material morto (g. Kg¹), para mensurar as porcentagens destas frações na composição morfológica dos capins estudados. Após a obtenção das proporções citadas, realizou-se a divisão da fração lâmina foliar pela fração colmo + bainha para a determinação da Razão Folha: Colmo (Kg. Kg¹).

4) Altura de Plantas e Densidade da Forragem: em cada ponto de coleta e para cada data de amostras, foi medido a altura média das plantas, em três pontos dentro de cada metro linear de coleta, totalizando 09 avaliações por local e data de coleta. De posse da altura média das plantas, bem como da estimativa de produção de massa seca por hectare (Kg. Cm¹), realizou-se a divisão da massa seca pela altura, obtendo-se a densidade da forragem para cada local e data de coleta.

Todos os dados foram analisados seguindo o delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial 3 x 8, com. Devido a inexistência de interação entre as cultivares estudadas e a idade de cortes, os dados referentes as cultivares sobre a composição bromatológica foram avaliados por meio de análises de variância (ANOVA) e teste de Tukey. Enquanto aos dados referentes aos dias de corte das gramíneas, além da ANOVA, foi realizado análise de regressão, utilizando o comando PROC MIXED para comprara por meio de contrastes ortogonais. Foi adotado $P < 0,05$ como nível crítico para tomada de decisões, e o pacote estatístico utilizado foi o SAS (Statistical Analysis System, 2015).

Resultados e Discussão

Não houve interação entre os fatores cultivares de capins e dias de corte. Desta forma, os dados referentes a produção e características morfológicas das cultivares de Capim Elefante, foram avaliados separadamente, ao passo que com os dados gerais, realizou-se também uma comparação entre os capins, considerando o final do ciclo de avaliação (77 dias).

Frente ao exposto acima, observa-se na Tabela 1 e Figura 1, que o Capiaçú apresentou resultado linear positivo para a variável Altura (ALT) em função dos dias de corte, sendo que o mesmo apresentou aumento de 2,5516 cm para cada dia de rebrotação, em média. Este resultado pode ser considerado normal e importante para a produção de massa de forragem, haja vista que, geralmente, com o passar do tempo, os capins tendem

a elevar a altura da planta para melhor realizar a captação de luz solar, e de acordo com Andrade *et al.* (2005), 90% da produção de MS das plantas é devido ao aumento de área foliar, interceptação luminosa (IL) e fotossíntese realizada pelas plantas, na medida em que aumentam a altura da planta, até chegar ao limite de 95% de IL.

O mesmo comportamento linear positivo foi observado para as variáveis teor de MS e produção de massa seca (PMS), com aumento de 0,3815% e 443,74 Kg para cada dia de rebrotação, respectivamente (Tabela 1 e Figura 1). Vale destacar que, de acordo com Van Soest (1994), o teor de MS adequado para a produção de silagens de qualidade é a faixa entre 28 a 32% de MS, logo, ao considerarmos os resultados obtidos no presente estudo, o Capiçu apresentou resultado adequado após os 70 dias de rebrotação. Esta afirmação pode ser reforçada pela estabilidade observada na PMS, onde após os 70 dias, a produção estabilizou em aproximadamente 20.000 kg.ha⁻¹.

Com relação a composição morfológica, especialmente as porcentagens de folha e colmo, observa-se na Tabela 1 e Figura 1 que com o avanço dos dias de rebrotação, ocorreu a redução linear na %FOL e aumento linear na %COL, com resultados de -0,8276% de folhas e +0,812% de colmo para cada dia após a rebrotação, respectivamente. Para a porcentagem de material morto (MOR) não se observou diferença significativa, com média geral de 2,1578% independentemente dos dias após a rebrotação (Tabela 1).

Novamente podemos inferir que estes resultados são normais em relação ao desenvolvimento da parte aérea de plantas forrageiras, pois com o passar do tempo, as plantas tendem ao alongar o colmo e, devido maior altura das plantas, ocorre maior competição por luz que resulta em alongamento do colmo, para expor as novas folhas na parte superior da planta. Assim, ocorre o sombreamento das folhas mais baixas e dos perfilhos menores, que tendem a morrer, o que explica a redução na porcentagem de folhas e aumento na porcentagem de colmo (Silva, 2011).

Para a variável razão folha: colmo (RF:C) obteve-se efeito linear negativo, onde o avanço nos dias após a rebrotação ocasionou a redução na RF:C de -0,02639 para cada dia após a rebrotação. Este resultado pode ser justificado pelas afirmações anteriores, onde observou-se redução de folhas e aumento do colmo em função dos dias de rebrotação. (Tabela 1 e Figura 1). O que pode ser justificado pelo mecanismo de adaptação da planta, por meio da emissão de novas folhas em extratos mais altos, buscando melhorar a IL e reduzir o sombreamento das folhas inferiores, favorecendo a

fotossíntese líquida da planta (produção de novas folhas – morte de folhas sombreadas) (Huylenbroeck & Bockstaele, 2001).

Em relação a variável densidade da forragem (DEN), também se obteve efeito linear positivo, ou seja, aumento de 2,4563 kg de forragem para cada dia após a rebrotação (Tabela 1 e Figura 1). Este resultado também pode ser considerado esperado e normal, além de ser justificado e reforçado pelos resultados de aumento de altura e de produção (PMS) em função do avanço nos dias de rebrotação. Logo, se considerarmos que a densidade é a massa em relação à altura da planta., os aumentos de altura e PMS corroboram com o aumento na densidade observado no presente estudo.

Figura 1. Altura, Produção de Massa Seca, Relação Folha: Colmo, Densidade do Capim Elefante Capiacu em diferentes épocas de corte.

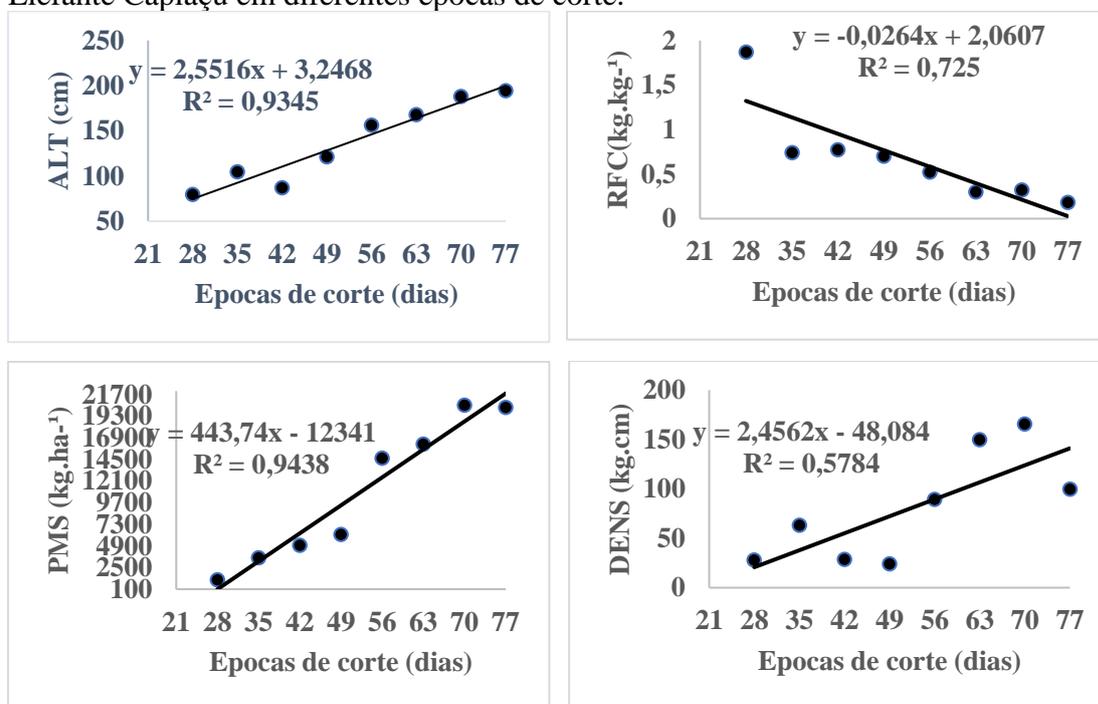


Tabela 1. Composição bromatológica do Capim Elefante Capiaçú (*Pennisetum purpureum* Schum) manejado sob diferentes dias de corte na região do recôncavo baiano.

Variável	Épocas de corte (dias)								EPM ¹	CV ²	Valor de P	
	28	35	42	49	56	63	70	77			L	Q
ALT (cm)	79,33	104,33	87,00	121,00	156,00	167,67	188,00	194,33	1,383	33,43	<0.0001	0.6931
MS (%)	13,17	15,44	14,35	14,00	26,22	24,86	30,46	28,23	0,546	34,27	<0.0001	0.5335
PMS (kg. ha ⁻¹)	1168,96	3606,98	4966,41	6171,80	14652,22	16221,80	20541,22	20312,26	17,774	68,20	<0.0001	0.6880
FOL (g.kg ⁻¹)	63,18	41,83	39,89	38,93	33,09	22,44	23,29	15,21	0,810	45,37	<0.0001	0.2873
COL (g.kg ⁻¹)	36,38	56,83	56,97	59,42	65,29	76,02	75,07	82,48	0,806	24,54	<0.0001	0.3608
MOR(g.kg ⁻¹)	1,32	1,35	3,13	2,47	1,62	2,31	2,45	2,30	0,217	52,46	0.5368	0.5474
RFC (kg.kg ⁻¹)	1,87	0,74	0,77	0,70	0,52	0,30	0,32	0,18	0,157	87,48	0.0100	0.0450
DENS (kg.cm ⁻¹)	27,84	62,93	28,33	23,87	89,24	149,65	165,58	99,51	1,648	80,61	0.0013	0.9599
Equação de regressão												
ALT (cm)	Y = 3.2500 + 2.5516x											0.93
MS (%)	Y = 0.8146 + 0.3815x											0.81
PMS (kg. ha ⁻¹)	Y = -12341 + 443.74x											0.94
FOL (g.kg ⁻¹)	Y = 78.1854 - 0.8276x											0.91
COL (g.kg ⁻¹)	Y = 20.9707 + 0.8112x											0.92
MOR(g.kg ⁻¹)	Y = 2.1578											-
RFC (kg.kg ⁻¹)	Y = 2.0618 - 0.02639x											0.83
DENS (kg.cm ⁻¹)	Y = -48.0897 + 2.4563x											0.57

¹EPM= erro padrão da média; ²CV= coeficiente de variação; L=linear; Q=quadrático

Observa-se na Tabela 2 e Figura 2, que o Capim Elefante Roxo apresentou resultado linear positivo para a variável Altura (ALT) em função dos dias de corte, sendo expresso o aumento de 2,5641 cm para cada dia de rebrotação, em média.

Para as variáveis Teor de Matéria Seca (MS) e Produção de Massa Seca (PMS), também se observou o efeito linear positivo com aumento de 0,3671% e 317,47 kg.ha⁻¹, respectivamente. (Tabela 2 e Figura 2). Porém, apresentando resultado inadequado no teor de MS para a produção de silagem até os 77 dias de rebrotação.

Na composição morfológica referente as porcentagens de folha e colmo, pode ser observado na Tabela 2, que com o aumento dos dias de rebrotação, houve uma redução linear na %FOL de -0,7738%, um aumento linear na %COL de +0,7640% e porcentagem de Material Morto (MOR) com ausência de diferença significativa, apresentando média geral de 3,1600% independente dos dias de rebrotação.

Pode ser observado na variável Razão Folha: Colmo (RFC) Tabela 2 e figura 2, o efeito linear negativo, com redução de -0,02982 g.Kg até o final do estudo. Para a variável Densidade (DENS), não foi observado diferença significativa, apresentando média geral de 45.9458 Kg.cm independente dos dias de rebrotação (Tabela 2).

Figura 2. Altura, Produção de Massa Seca, Relação Folha: Colmo do Capim Elefante Roxo em diferentes épocas de corte.

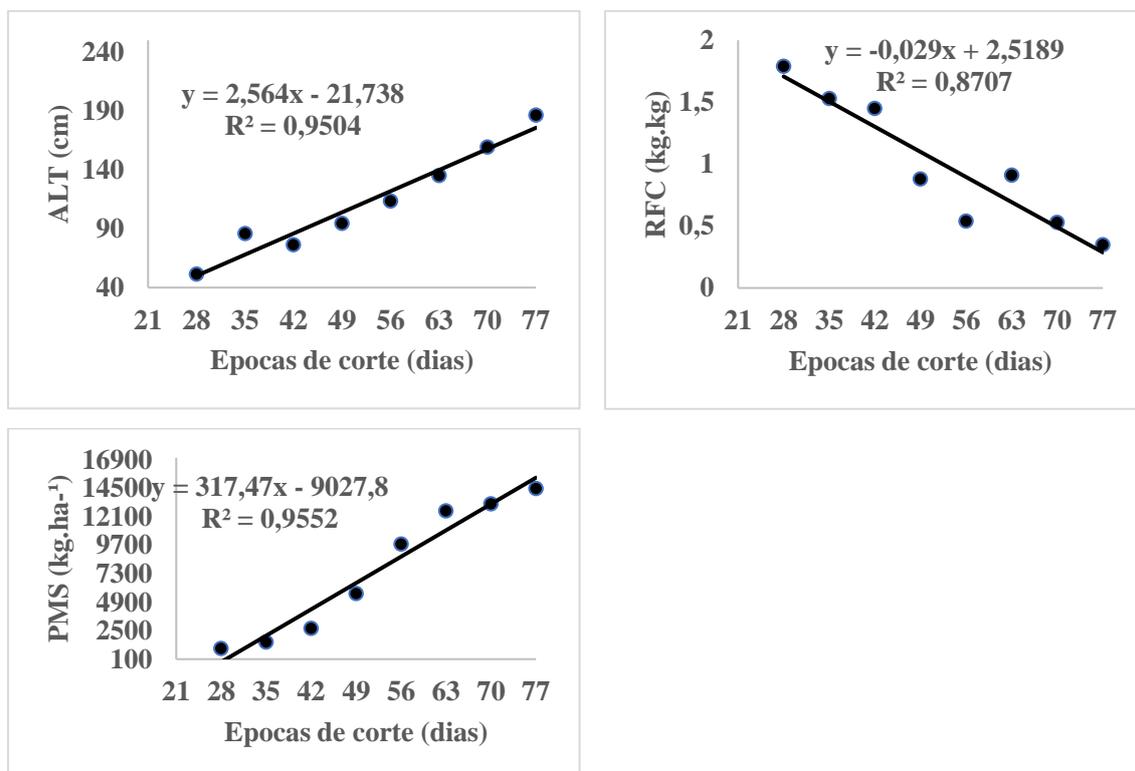


Tabela 2. Composição bromatológica do Capim Elefante Roxo (*pennisetum purpureum* Schum) manejado sob diferentes dias de corte na região do recôncavo baiano.

Variável	Épocas de corte (dias)								EPM	CV	Valor de P	
	28	35	42	49	56	63	70	77			L	Q
ALT (cm)	51,33	86,00	76,33	94,67	113,67	135,33	159,33	186,33	1,381	40,54	<0,0001	0,0948
MS (%)	14,17	12,88	15,09	14,72	24,22	27,25	28,55	27,23	0,527	32,54	<0,0001	0,6749
PMS (kg.ha ⁻¹)	1024,80	1549,78	2711,55	5642,73	9822,49	12637,46	13221,96	14503,93	14,948	70,20	<0,0001	0,9923
FOL (g.kg ⁻¹)	63,33	60,29	57,71	45,66	34,34	40,68	33,88	26,12	0,803	34,16	<0,0001	0,7196
COL (g.kg ⁻¹)	36,67	39,71	41,00	54,34	64,39	59,32	64,45	73,88	0,800	28,30	<0,0001	0,8129
MOR(g.kg ⁻¹)	-	-	3,85	-	1,89	-	5,00	-	0,266	53,66	0,7232	0,2925
RFC (kg.kg ⁻¹)	1,79	1,53	1,45	0,88	0,54	0,91	0,53	0,35	0,160	61,56	<0,0001	0,3346
DENS (kg.cm ⁻³)	26,81	18,39	71,63	22,24	61,06	35,94	106,00	25,50	1,580	130,37	0,5288	0,5939
Equação de regressão												
ALT (cm)	Y = -21.7381 + 2.5641x											0,97
MS (%)	Y = 1.2424 + 0.3671x											0,84
PMS (kg.ha ⁻¹)	Y = -9027.83 + 317.47x											0,95
FOL (g.kg ⁻¹)	Y = 85.8768 - 0.7738x											0,91
COL (g.kg ⁻¹)	Y = 14.1096 + 0.7640x											0,91
MOR(g.kg ⁻¹)	Y = 3.1600000											-
RFC (kg.kg ⁻¹)	Y = 2.5189 - 0.02892x											0,87
DENS (kg.cm ⁻³)	Y = 45.9458333											-

¹EPM= erro padrão da média; ²CV= coeficiente de variação; L=linear; Q=quadrático

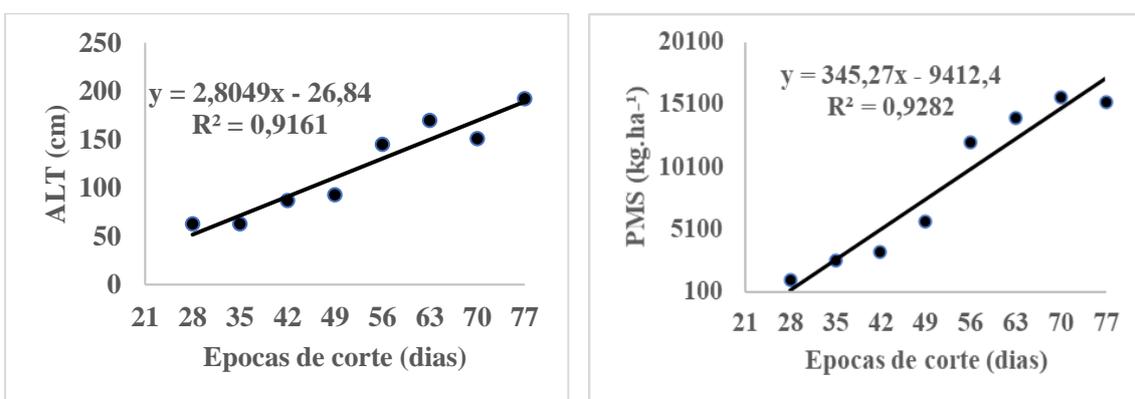
Na Tabela 3 e Figura 3, observa-se que para a variável Altura (ALT) o capim Napier, apresentou efeito linear positivo em função dos dias de rebrotação, sendo o aumento de 2,8050 cm. Observa-se também o efeito linear positivo nos resultados referentes as variáveis Teor de Matéria Seca (MS) sendo o aumento de 0,3226% e Produção de Massa Seca (PMS) sendo o aumento de 345,27 kg.ha⁻¹. Entretanto, o teor de MS observado até os 77 dias de rebrotação não satisfaz o recomendado para a produção de silagem (Tabela 3 e Figura 3).

Os resultados para a composição morfológica aplicado para porcentagens de folha e colmo indicam, na Tabela 3, que aconteceu uma redução linear na %FOL de -0,6305% e um aumento linear na %COL de +0,5561%, em função dos dias de rebrotação. Quando observado a porcentagem de Material Morto (MOR), nota-se o efeito linear positivo, com um aumento de 0,08176% em relação aos dias de rebrotação.

Estes resultados podem ser considerados normais, haja vista que na medida em que os dias de rebrotação vão avançando, a planta forrageira tende a aumentar sua altura para buscar maior interceptação luminosa, o que ocasiona elevação na % de COL, bem o que resulta em sombreamento das folhas mais velhas e inferiores, elevando assim a % de MM

Em relação a variável Razão Folha: Colmo (RFC) observou-se na Tabela 3 e Figura 3, o efeito linear negativo, apresentando redução de -0,01618 g.Kg. A variável Densidade (DENS) não apresentou diferença significativa, resultando em média geral de 57.42958 Kg.cm independente dos dias de rebrotação.

Figura 3. Altura, Produção de Massa Seca, Relação Folha: Colmo do Capim Elefante Napier em diferentes épocas de corte.



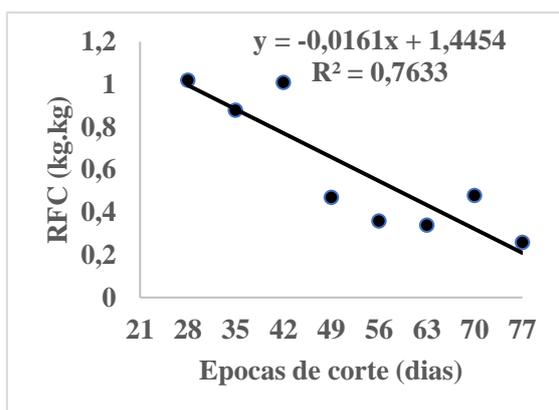


Tabela 3. Composição bromatológica do Capim Elefante Napier (*pennisetum purpureum* Schum) manejado sob diferentes dias de corte na região do recôncavo baiano.

Variável	Époacas de corte (dias)								EPM	CV	Valor de P	
	28	35	42	49	56	63	70	77			L	Q
ALT (cm)	62,67	62,67	87,00	93,00	145,00	169,67	151,00	192,33	1,432	40,84	<0.0001	0.7805
MS (%)	13,63	14,60	14,87	13,12	25,01	25,94	27,25	25,17	0,516	32,03	<0.0001	0.9877
PMS (kg.ha ⁻¹)	1100,78	2586,18	3263,66	5768,35	12066,90	14000,27	15678,33	15250,92	15,798	68,73	0.0327	0.5960
FOL (g.kg ⁻¹)	50,32	45,82	48,32	31,57	25,89	24,90	29,93	19,56	0,726	36,64	<0.0001	0.3109
COL (g.kg ⁻¹)	49,68	52,84	50,23	67,45	71,81	74,03	65,80	76,32	0,694	18,20	<0.0001	0.2165
MOR(g.kg ⁻¹)	.	1,34	2,17	1,48	2,30	1,61	6,41	4,12	0,305	81,21	0.0215	0.5281
RFC (kg.kg ⁻¹)	1,02	0,88	1,01	0,47	0,36	0,34	0,48	0,26	0,119	56,72	<0.0001	0.2108
DENS (kg.cm ⁻³)	37,94	49,99	31,44	63,32	70,85	130,45	39,69	35,74	1,336	74,61	0.4708	0.0889
Equação de regressão												
ALT (cm)	Y = -26.8452 + 2.8050x										0.91	
MS (%)	Y = 3.0638 + 0.3216x										0.75	
PMS (kg.ha ⁻¹)	Y = -9412.38 + 345.27x										0.92	
FOL (g.kg ⁻¹)	Y = 67.6369 - 0.6305x										0.84	
COL (g.kg ⁻¹)	Y = 34.3257 + 0.5561x										0.78	
MOR(g.kg ⁻¹)	Y = -1.8354 + 0.08176x										0.62	
RFC (kg.kg ⁻¹)	Y = 1.4527 - 0.01618x										0.80	
DENS (kg.cm ⁻³)	Y = 57.4295833										-	

¹EPM= erro padrão da média; ²CV= coeficiente de variação; L=linear; Q=quadrático

Para as três cultivares de Capim Elefante estudadas não foram observadas diferenças significativas para as variáveis altura, teor de MS, produção de MS e porcentagem de material morto (Tabela 4). Embora não tenha havido diferenças estatísticas, a cultivar Capim Elefante Capiáçu, foi a única dentre as três cultivares a apresentar teor MS adequado para a produção de silagem, atingindo o teor de MS acima de 28%, conforme recomendado por Van Soeste (1994). Da mesma forma, destaca-se que o Capiáçu produziu aproximadamente 500 Kg a mais que as demais cultivares, logo, mesmo não havendo diferença estatísticas, na prática e para o produtor rural, essa diferença é importante, por isso merece esse destaque.

Em relação a variável porcentagem de folhas (%FOL), nota-se que a cultivar Roxo apresentou melhor desempenho, ao passo que a cultivar Capiaçú expressou o pior resultado (Tabela 4). Já para a porcentagem de colmo (%COL), novamente o Capuaçu apresentou o pior resultado, haja vista que este capim teve maior %COL, o que não é desejado do ponto de vista da alimentação e nutrição animal. Já as cultivares Roxo e Verde não diferiram entre si, e apresentaram menor proporção de colmo em relação ao Capiaçú.

No entanto, quando se observa a variável Razão Folha:Colmo (RF:C), já o Capiaçú apresentou o melhor desempenho, não havendo diferença estatística entre as cultivares Verde e Roxa. Destaca-se que este resultado é importante para qualificar a planta forrageira, haja vista que a RF:C é a razão entre quantidade de Folhas e quantidade de Colmo, logo, independentemente dos resultados individuais de Folha e Colmo, a RF:C pode evidenciar um equilíbrio entre essas frações, indicando que o capim pode possibilitar desempenho satisfatório aos animais. Desta forma, como o Capiaçú apresentou maior RF:C, já seria esperado que o mesmo apresentasse maior Densidade de forragem (Kg.cm^{-1}), superando novamente as cultivares Verde e Roxo (Tabela 4).

Tabela 4. Produção de diferentes cultivares do Capim Elefante (*pennisetum purpureum* Schum) na região do recôncavo baiano.

Variável	Cultivares			EPM	CV	p-Valor
	Napier	E. Roxo	Capiaçú			
ALT (cm)	192.33	186.33	194.33	1,288	8.76	0.8353
MS (%)	25.173	27.232	28.234	0,555	10.39	0.4425
PMS (Kg.ha^{-1})	15251	14504	20312	19,623	14.71	0.0534
FOL (g.Kg^{-1})	19.560B	26.116 ^a	15.215C	0,743	8.23	0.0006
COL (g.Kg^{-1})	76.315B	73.884B	82.484A	0,686	2.65	0.0056
MOR(g.Kg^{-1})	4.1245	-	2.3011	0,403	37.24	0.1354
RFC (Kg.Kg^{-1})	0.25657B	0.18477B	0.35433A	0,093	10.89	0.0011
DENS (Kg.cm^{-1})	35.74B	25.50B	99.51A	2,132	46.55	0.0217

CV= coeficiente de variação; EPM= erro padrão da média. Letras diferentes, nas linhas, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Conclusão

Quando comparadas as três cultivares de Capim Elefante, concluímos que a cultivar Elefante Roxo apresenta maior produção de folha do que as demais cultivares analisadas. A cultivar Elefante Capiaçú, se destaca pela sua produção de colmo ser maior do que as demais cultivares. Ao observar os resultados das variáveis Razão Folha: Colmo

e Densidade, a cultivar Elefante Capiaçú apresenta qualidade superior as demais cultivares estudadas.

Contudo, concluímos que para as cultivares Elefante Capiaçú e Elefante Napier no período de seca, a idade de corte recomendada seria por volta dos 70 dias da rebrotação, onde os mesmos apresentaram estabilidade produtiva na PMS. Para a cultivar Elefante Roxo, conclui-se que sejam realizados mais estudos com maiores períodos de corte das forrageiras, pois o período de corte em 77 dias da rebrotação estabelecido nesse estudo não foi suficiente para expressar todo o potencial produtivo da cultivar.

Referências

- CASTILLO, K.M.; ORLANDI, G.S.; SCHEIBLER, R.B.; RIZZO, F.A.; PINHEIRO, L.A.; SCHAFHAUSER JUNIOR, J. **Valor nutritivo das silagens de capim-elefante brs capiaçu em duas idades de corte**. EMPOS - XIX Encontro de Pós-graduação. UFPEL, 2017. Disponível em: https://cti.ufpel.edu.br/siepe/arquivos/2017/CA_04031.pdf. Acesso em: 05 mai. 2023.
- CÓSER, A.C.; MARTINS, C.E.; DERESZ, F. **Capim-elefante: formas de uso na alimentação animal**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2000. 27 p.
- HUYLENBROECK, J.M.V.; BOCKSTAELE, E.V. Effects of shading on photosynthetic capacity and growth of turfgrass species. **Research Journal**, 2001. 353-359 p.
- ITALIANO, E.C.; PEREIRA, A.V.; LEDO, F.J.S. **Comportamento produtivo de cultivares de capim-elefante**. Comunicado Técnico 166. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2004.
- LEAL, V.N. **Desempenho de cultivares e épocas de corte de capim-elefante irrigado em Ceres (GO)**. 2019. 70f. Dissertação (Mestrado em Irrigação no Cerrado) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Ceres, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ifgoiano.edu.br/bitstream/prefix/1781/1/2020-03-04-09-44-16VANESSA%20NUNES.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2023.
- LIMA, E.S.; SILVA, J.F.C.; VÁSQUEZ, H.M.; ANDRADE, E.N. et al. Características agrônômicas e nutritivas das principais cultivares de capim-elefante do Brasil. **Veterinária e Zootecnia**, 2010. 324-334 p.
- LOPES, B.A. **O capim-elefante**. Universidade Federal de Viçosa, 2004. Disponível em: <https://www.bibliotecaagptea.org.br/zootecnia/nutricao/livros/O%20CAPIM%20ELEFANTE.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2023.
- MAGALHÃES, J.A.; RODRIGUES, B.H.N.; SANTOS, F.J.S.; COSTA, N.L.; NETO, R.B.A. **Produtividade e teores de proteína bruta do capim-elefante cultivar Roxo sob efeito da idade de corte e da adubação nitrogenada**. Comunicado Técnico 248. Teresina: Embrapa Meio-Norte,

2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/188164/1/Comunicado-248.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2023.

MARTIN, L.C.T. **Bovinos – volumosos suplementares**. São Paulo: Editora Nobel, 1997. 143 p.

MARTINS, L.F.; PRADO, D.M.B.; GOMES, G.R.; TEXEIRA, A.M.; OLIVEIRA, L.N.; GONÇALVES, L.C.; OLIVEIRA, F.S. **Valor nutricional do capim-elefante verde colhido em diferentes idades de rebrota**. Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia, v. 72, p. 1881-1890, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-4162-11329>. Acesso em: 21 abr. 2023.

OLIVEIRA, V.C. **Silagem de capim-elefante**. Mato Grosso do Sul: AGRAER/SEMAGRO, 2018. Disponível em: <http://www.pesquisa.agraer.ms.gov.br/wp-content/uploads/2018/08/Silage-m-de-Capim-Elefante.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2023.

PINHO, R.M.A.; SANTOS, E.M.; BEZERRA, H.F.C.; OLIVEIRA, J.S.; CARVALHO, G.G.P.; CAMPOS, F.S.; PEREIRA, G.A.; CORREIA, R.M. Avaliação de fenos de capim-buffel colhido em diferentes alturas de corte. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, 2013. 437-447 p.

SILVA, A.A.; AREJACY, S. **Altura inicial e adubação nitrogenada em pastos diferidos de capim-braquiária**. 2011. 53 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Faculdade de Zootecnia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SILVA, J.N.S. **Recomendações para idade de corte em cultivares de capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum) no Recôncavo da Bahia**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2022.

VAN SOEST, P.J. **Nutritional ecology of the ruminant**. 2. ed. Ithaca New York: Cornell University Press, 2014. 476 p.

CAPÍTULO 7

VARIAÇÃO MORFOLÓGICA EM RAÍZES DE ESPÉCIES DE PLANTAS CULTIVADAS E SEU IMPACTO NA ABSORÇÃO DE NUTRIENTES

MORPHOLOGICAL VARIATION IN ROOTS OF CULTIVATED PLANT SPECIES AND ITS IMPACT ON NUTRIENT ABSORPTION

DOI: <https://doi.org/10.56001/24.9786500981315.07>

Submetido em: 19/11/2024

Revisado em: 27/11/2024

Publicado em: 29/11/2024

Jordana Caroline Nagel

Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo-RS

<http://lattes.cnpq.br/1544914259635851>

Resumo

A morfologia radicular de espécies cultivadas exerce um papel determinante na eficiência da absorção de nutrientes, influenciando diretamente o desenvolvimento e o rendimento das plantas. A compreensão dessas variações é fundamental para aprimorar as práticas agrícolas e o manejo nutricional das culturas. Este estudo analisa como as diferentes características morfológicas das raízes impactam a captação de nutrientes, destacando os atributos que promovem maior eficiência nutricional e sugerindo estratégias que possam elevar a produtividade agrícola. Foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente, com base em artigos científicos e publicações especializadas, explorando a relação entre morfologia radicular e absorção de nutrientes em espécies cultivadas. Foram avaliados parâmetros como comprimento, área superficial e densidade radicular, correlacionando-os à eficiência na captação de nutrientes. A literatura revisada aponta que raízes com maior comprimento e área superficial apresentam maior capacidade de absorção, sobretudo em solos com baixa disponibilidade nutricional. Sistemas radiculares profundos favorecem o acesso a nutrientes de camadas mais profundas do solo, enquanto raízes superficiais são mais eficazes na captação de nutrientes móveis, como o nitrogênio. Além disso, a presença de raízes finas e ramificadas aumenta a área de contato com o solo, otimizando a eficiência de absorção. Tais características morfológicas são influenciadas tanto por fatores genéticos quanto ambientais, reforçando a importância de práticas de manejo e programas de melhoramento genético para otimizar a arquitetura radicular com foco na eficiência nutricional. Assim, o entendimento sobre a variação morfológica das raízes possibilita o desenvolvimento de estratégias que promovam sistemas agrícolas mais sustentáveis e produtivos.

Palavras-Chave: morfologia radicular, absorção de nutrientes, espécies cultivadas, eficiência nutricional, manejo agrícola

Abstract

The root morphology of cultivated species plays a determining role in the efficiency of nutrient absorption, directly influencing the development and yield of plants. Understanding these variations is fundamental to improving agricultural practices and nutritional management of crops. This study analyzes how the different morphological characteristics of roots impact nutrient uptake, highlighting the attributes that promote greater nutritional efficiency and suggesting strategies that can increase agricultural productivity. A comprehensive bibliographic review was carried out, based on scientific articles and specialized publications, exploring the relationship between root morphology and nutrient absorption in cultivated species. Parameters such as length, surface area and root density were evaluated, correlating them to efficiency in nutrient uptake. The reviewed literature points out that roots with greater length and surface area have greater absorption capacity, especially in soils with low nutritional availability. Deep root systems favor access to nutrients from deeper layers of the soil, while superficial roots are more effective in capturing mobile nutrients, such as nitrogen. Furthermore, the presence of fine, branched roots increases the area of contact with the soil, optimizing absorption efficiency. Such morphological characteristics are influenced by both genetic and environmental factors, reinforcing the importance of management practices and genetic improvement programs to optimize root architecture with a focus on nutritional efficiency. Thus, understanding the morphological variation of roots makes it possible to develop strategies that promote more sustainable and productive agricultural systems.

Keywords: root morphology, nutrient uptake, cultivated species, nutritional efficiency, agricultural management

Introdução

As raízes desempenham um papel crucial no desempenho das plantas cultivadas, sendo determinantes na eficiência da absorção de nutrientes, no crescimento e na produtividade agrícola. Nos últimos anos, diversos estudos têm demonstrado que as características morfológicas do sistema radicular, como o comprimento, a densidade e a área superficial, são fundamentais para a exploração do solo e a captação de nutrientes essenciais. Essa relação é especialmente evidente em solos com baixa disponibilidade nutricional, onde a eficiência na absorção pode ser potencializada por sistemas radiculares adaptados (Hostetler *et al.*, 2020).

Além da arquitetura radicular, a capacidade das plantas em ajustar suas raízes às condições do ambiente – uma característica conhecida como plasticidade fenotípica – representa uma estratégia adaptativa importante. Essa plasticidade permite que as raízes modifiquem sua estrutura em resposta à disponibilidade de água e nutrientes no solo, aumentando sua eficiência em condições adversas. Segundo Schneider e Lynch (2020), essa adaptabilidade é essencial para a sobrevivência e o bom desempenho das plantas em diferentes cenários edafoclimáticos.

Outro fator de grande relevância é a interação entre as raízes e os microrganismos do solo, em especial os fungos micorrízicos. A simbiose micorrízica é amplamente reconhecida como um processo que melhora a absorção de nutrientes como fósforo e

zinco, além de fortalecer a saúde geral das plantas. Conforme relatado por Zhang *et al.* (2023), raízes densamente ramificadas favorecem a colonização por micorrizas, o que é particularmente vantajoso em solos de baixa fertilidade.

As práticas agrícolas modernas também exercem influência significativa na morfologia radicular. Estratégias como a escolha de cultivares com sistemas radiculares mais eficientes, o manejo adequado do solo e a utilização de técnicas como a rotação de culturas podem melhorar a absorção de nutrientes e reduzir a dependência de fertilizantes químicos. De acordo com Hostetler *et al.* (2020), essas práticas sustentáveis, alinhadas ao manejo da estrutura radicular, são cruciais para alcançar maior produtividade com menor impacto ambiental.

Nesse contexto, os avanços na fenotipagem de raízes e na genômica têm permitido uma análise mais detalhada das características radiculares associadas à eficiência nutricional. Tecnologias como modelagem tridimensional e análise de imagens de alta precisão têm contribuído para identificar genótipos com maior potencial de absorção de nutrientes em diferentes condições edafoclimáticas. Esses avanços reforçam a importância de integrar conhecimentos técnicos ao manejo agrícola, tornando-o mais eficiente e alinhado às demandas por sustentabilidade.

Compreender as variações morfológicas das raízes em espécies cultivadas e sua relação com a absorção de nutrientes é uma abordagem estratégica para a agricultura sustentável. Investigando como essas características podem ser otimizadas por meio de práticas agrícolas, manejo do solo e melhoramento genético, é possível desenvolver sistemas produtivos mais resilientes, eficientes e ambientalmente responsáveis.

Metodologia

Este estudo baseou-se em uma revisão bibliográfica com o objetivo de reunir e analisar informações já disponíveis sobre a variação morfológica das raízes em espécies cultivadas e seu impacto na eficiência de absorção de nutrientes. A revisão foi realizada em três etapas principais, descritas a seguir.

Inicialmente, foram selecionados artigos científicos, revisões de literatura, teses, dissertações e publicações técnicas que tratassem da relação entre a morfologia radicular – considerando parâmetros como comprimento, área superficial e densidade das raízes – e a eficiência de absorção de nutrientes em plantas cultivadas. Trabalhos que abordavam exclusivamente espécies não cultivadas ou que não apresentassem dados quantitativos ou qualitativos sobre a absorção de nutrientes foram excluídos da análise.

As fontes de pesquisa incluíram bases de dados científicas amplamente reconhecidas, como SciELO, PubMed, Web of Science e Google Scholar. Para a busca, foram utilizados termos como “morfologia radicular”, “absorção de nutrientes”, “eficiência nutricional em plantas cultivadas”, “variação radicular” e “manejo de sistemas radiculares”. Palavras-chave em inglês também foram empregadas, ampliando a abrangência da pesquisa.

Os dados coletados foram organizados e categorizados com base nos diferentes parâmetros morfológicos analisados nos estudos, como comprimento, área superficial e densidade das raízes, além de características como a presença de raízes proteoides. Cada trabalho foi avaliado quanto à metodologia adotada, condições experimentais e principais resultados. Essa avaliação incluiu a análise das condições edafoclimáticas e das espécies investigadas, garantindo que as fontes utilizadas fossem relevantes e de alta qualidade.

Após a coleta e categorização, foi realizada uma análise crítica dos dados, confrontando informações provenientes de diferentes estudos para validar os achados. As lacunas identificadas na literatura também foram destacadas, permitindo a formulação de propostas para futuros estudos que possam avançar no entendimento sobre o tema. Essa abordagem garantiu um levantamento abrangente e bem fundamentado, com foco em práticas de manejo agrícola e estratégias de melhoramento genético voltadas para a eficiência nutricional das plantas.

Por meio dessa metodologia, foi possível reunir evidências científicas consistentes que subsidiam o desenvolvimento de estratégias agrícolas mais eficazes e sustentáveis, baseadas na otimização da morfologia radicular.

Resultados e Discussão

A morfologia radicular das espécies cultivadas influencia diretamente o desenvolvimento e o rendimento das culturas, sendo um fator essencial para a eficiência na captação de nutrientes. Estudos demonstram que raízes mais finas, com diâmetro inferior a 2 mm, apresentam alta eficiência na absorção de nutrientes devido à maior área de contato com o solo. Além disso, essas raízes possuem elevada plasticidade fenotípica, o que permite ajustes na arquitetura radicular em resposta a variações ambientais, como deficiência de água e nutrientes no solo (Lavinsky *et al.*, 2014).

Adaptações morfológicas específicas, como a formação de raízes proteoides ou raízes em cacho, são observadas em algumas espécies e desempenham um papel estratégico na absorção de fósforo em solos com baixa disponibilidade desse nutriente.

Essas raízes liberam exsudatos orgânicos que solubilizam o fósforo indisponível, aumentando sua disponibilidade para a planta (Neumann *et al.*, 2010). Esse mecanismo é particularmente relevante em solos tropicais altamente intemperizados, onde o fósforo frequentemente encontra-se em formas não assimiláveis.

Parâmetros como comprimento, volume e área superficial das raízes estão diretamente relacionados à eficiência de absorção de nutrientes. Em estudos com arroz irrigado, variações genéticas na arquitetura radicular resultaram em diferenças significativas na capacidade de captação de potássio, reforçando a importância de sistemas radiculares robustos para a exploração eficiente do solo (Gamuyao *et al.*, 2012). Esses resultados apontam para a relevância do melhoramento genético em programas que visam otimizar a funcionalidade do sistema radicular em diferentes condições edafoclimáticas.

Outro aspecto importante é a compactação do solo, que pode afetar negativamente a morfologia radicular ao dificultar o crescimento das raízes e reduzir sua capacidade de absorção. A compactação altera a relação córtex/cilindro vascular, prejudicando o transporte interno de nutrientes e água. No entanto, raízes finas e com alta densidade têm maior capacidade de penetrar em solos compactados, mitigando parcialmente os efeitos adversos dessa condição (Bengough *et al.*, 2011).

A capacidade das raízes de adaptar sua arquitetura em resposta a condições ambientais adversas, como a escassez de nutrientes, destaca a relevância da plasticidade fenotípica no desenvolvimento vegetal. Em cenários de baixa disponibilidade de fósforo, por exemplo, certas espécies demonstram alterações morfológicas significativas, caracterizadas pelo desenvolvimento de raízes mais finas e pelo aumento na densidade de pelos radiculares. Essas mudanças estruturais ampliam a superfície de contato das raízes com o solo, otimizando a captação de nutrientes essenciais para o metabolismo da planta (Lynch, 2019).

Além disso, a interação entre raízes e microrganismos do solo, especialmente fungos micorrízicos, tem um impacto significativo na eficiência de absorção de nutrientes. Esses microrganismos ampliam a rede de absorção por meio de hifas que se conectam às raízes, melhorando a captação de nutrientes como fósforo e nitrogênio. Raízes mais densas e finas facilitam essa colonização simbiótica, potencializando a nutrição da planta (Smith; Read, 2008).

As raízes adventícias, como as *brace roots* observadas no milho, desempenham um papel crucial na estabilidade estrutural da planta, além de contribuírem

significativamente para a absorção de nutrientes. Essas raízes, que se desenvolvem acima da superfície do solo, apresentam uma notável capacidade adaptativa, podendo surgir em resposta a diferentes condições ambientais. Além de aumentar a resistência mecânica da planta, elas assumem funções complementares na captação de recursos, especialmente em situações de estresse (Oliveira *et al.*, 2020).

Práticas agrícolas que promovem a formação de sistemas radiculares eficientes podem levar a um aumento significativo da produtividade e sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Por exemplo, cultivares com sistemas radiculares profundos são capazes de explorar camadas mais profundas do solo, acessando água e nutrientes indisponíveis para plantas com raízes superficiais. Esse tipo de adaptação é especialmente valioso em ambientes sujeitos a períodos de seca prolongada, onde a profundidade das raízes contribui para a resiliência hídrica das plantas (Schroeder *et al.*, 2018).

Sistemas radiculares profundos desempenham uma função vital em ambientes caracterizados por secas prolongadas, ao fornecer maior resiliência hídrica às culturas agrícolas. De acordo com Lynch (2019), essas raízes não se limitam a melhorar a captação de água em camadas mais profundas do solo, mas também facilitam a exploração eficiente de nutrientes móveis, como o nitrato, contribuindo diretamente para a produtividade e a sustentabilidade das plantas em condições de estresse hídrico.

A densidade radicular destaca-se como uma característica amplamente investigada nos últimos anos, devido à sua associação com a eficiência na captação de nutrientes, especialmente em solos compactados. Estudos realizados por Bengough *et al.* (2011) evidenciam que raízes com maior densidade, particularmente as mais finas, possuem notável capacidade adaptativa para penetrar em solos com alta resistência mecânica, assegurando o fornecimento de nutrientes essenciais.

Adicionalmente, a contribuição das raízes secundárias e terciárias tem se mostrado crucial na absorção de nutrientes em culturas de ciclo curto, como as leguminosas. Essas estruturas desempenham um papel significativo ao aumentar a eficiência na exploração do solo. Segundo Rubio *et al.* (2021), raízes finas nessas plantas demonstram elevada eficácia em condições de baixa fertilidade, otimizando a captação de recursos e promovendo o desenvolvimento sustentável das culturas.

A morfologia radicular das espécies cultivadas exerce influência direta na eficiência da simbiose com micorrizas arbusculares. Conforme destacado por Smith e Read (2008), raízes de menor diâmetro favorecem uma colonização mais ampla por fungos micorrízicos, o que aumenta significativamente a absorção de nutrientes

essenciais, como fósforo e zinco, beneficiando o metabolismo e o desenvolvimento das plantas.

Em solos de baixa fertilidade, raízes proteoides desempenham um papel crucial na mobilização de fósforo. Neumann *et al.* (2010) apontam que essas raízes, características de espécies como *Lupinus* spp., constituem uma estratégia adaptativa indispensável em ambientes onde a disponibilidade desse nutriente é limitada. Já as raízes adventícias, como as observadas em *Zea mays*, apresentam uma função diferenciada em situações de alagamento. Estudos realizados por Oliveira *et al.* (2020) demonstraram que, além de contribuírem para a estabilidade estrutural da planta, essas raízes são fundamentais para a absorção de oxigênio, um elemento essencial para a respiração e manutenção da atividade radicular em condições adversas.

A variação morfológica das raízes é amplamente reconhecida como um fator determinante para a eficiência no uso de nutrientes, sendo considerada uma estratégia central em programas de melhoramento genético. Nesse contexto, Gamuyao *et al.* (2012) desenvolveram cultivares de arroz com sistemas radiculares mais profundos, capazes de explorar camadas mais profundas do solo. Essas cultivares demonstraram maior eficiência na absorção de fósforo, reduzindo significativamente a dependência de fertilizantes químicos e contribuindo para sistemas agrícolas mais sustentáveis.

A arquitetura radicular desempenha um papel fundamental na eficiência de absorção de nutrientes em culturas como a soja (*Glycine max*) e o milho (*Zea mays*), influenciando diretamente o crescimento e a produtividade dessas plantas. Diferenças estruturais no sistema radicular entre essas espécies têm um impacto significativo na captação de nutrientes essenciais. O milho, por exemplo, caracteriza-se por um sistema radicular profundo e bem desenvolvido, o que possibilita uma exploração mais ampla do solo e o acesso a nutrientes localizados em camadas mais profundas (Brito *et al.*, 2017).

A soja, em contrapartida, apresenta um sistema radicular menos profundo, porém altamente ramificado, característica que favorece a absorção de nutrientes localizados nas camadas superficiais do solo. Essa adaptação é especialmente vantajosa em solos ricos em matéria orgânica, onde a disponibilidade de nutrientes é maior próximo à superfície (Cassol; Lima; Miquelluti, 2019). Outro aspecto relevante é a capacidade da soja de estabelecer simbiose com bactérias fixadoras de nitrogênio, que formam nódulos radiculares e desempenham um papel crucial na suplementação de nitrogênio para a planta, contribuindo diretamente para sua nutrição e desenvolvimento (Almeida *et al.*, 2016).

A eficiência na absorção de fósforo é diretamente influenciada pela morfologia radicular em ambas as culturas. No caso do milho, a taxa de crescimento do sistema radicular desempenha um papel crucial, pois raízes mais extensas ampliam a área de contato com o solo, facilitando a captação desse nutriente essencial (Silva *et al.*, 2018). Na soja, a relação entre o crescimento radicular e a absorção de fósforo também é evidente, uma vez que raízes mais desenvolvidas contribuem significativamente para melhorar a eficiência na aquisição desse elemento (Mendes; Barros, 2020).

A interação com fungos micorrízicos arbusculares é outro aspecto de grande importância. No milho, a colonização micorrízica desempenha um papel significativo na absorção de nutrientes, especialmente fósforo, graças à extensa rede de hifas que aumenta a exploração do solo e potencializa a captação desse elemento (Moreira; Siqueira, 2006). Na soja, embora a simbiose com micorrizas também seja relevante, destaca-se a fixação biológica de nitrogênio realizada pelos nódulos radiculares, que representa uma contribuição essencial para complementar a nutrição da planta e sustentar seu desenvolvimento (Almeida *et al.*, 2016).

Em síntese, as diferenças na morfologia radicular de soja e milho resultam em abordagens distintas para a absorção de nutrientes. O milho aproveita seu sistema radicular profundo para acessar nutrientes localizados nas camadas inferiores do solo, enquanto a soja adota uma estratégia baseada em seu sistema radicular altamente ramificado e na fixação biológica de nitrogênio para atender às suas demandas nutricionais. A compreensão dessas variações é fundamental para o manejo eficiente das culturas e para a otimização de práticas de fertilização no campo (Brito *et al.*, 2017; Cassol; Lima; Miquelluti, 2019).

A interação entre a morfologia radicular e as condições do solo é um fator importante a ser avaliado em sistemas agrícolas que utilizam práticas de manejo de conservação. Em solos sob plantio direto, a compactação superficial, comumente associada a esse sistema, pode favorecer o surgimento de raízes adventícias, que desempenham um papel crucial na exploração de nutrientes disponíveis nas camadas superiores do solo. Pesquisas indicam que plantas adaptadas a essas condições tendem a desenvolver uma maior proporção de raízes finas, o que contribui significativamente para a eficiência nutricional (Almeida *et al.*, 2019).

A relação entre as variações genéticas e a plasticidade radicular em cultivares modernas tem sido amplamente discutida na literatura atual. Estudos indicam que cultivares de milho e soja desenvolvidas para maior tolerância ao estresse hídrico

apresentam modificações significativas na densidade e na ramificação de suas raízes. Essas alterações estruturais não apenas aumentam a área de exploração do solo, mas também aprimoram a eficiência na absorção de nutrientes essenciais, especialmente em solos com baixa fertilidade ou submetidos a condições de seca prolongada (Ferreira *et al.*, 2022).

As práticas de biofortificação, que incluem a introdução de cultivares com sistemas radiculares mais eficientes na absorção de micronutrientes como ferro e zinco, destacam-se como uma abordagem promissora no contexto da agricultura sustentável. Raízes com maior capacidade de exsudação de compostos orgânicos desempenham um papel essencial nesse processo, pois facilitam a mobilização de micronutrientes no solo, tornando-os mais acessíveis para a absorção. Essa estratégia é particularmente relevante em culturas alimentares destinadas ao combate à desnutrição em regiões caracterizadas por solos marginais e de baixa fertilidade (Zhang *et al.*, 2024).

Além disso, o uso de técnicas avançadas, como a modelagem tridimensional aplicada à fenotipagem radicular, tem gerado avanços significativos na compreensão das interações entre arquitetura radicular e eficiência de absorção de nutrientes. Essas tecnologias permitem mapear o comportamento das raízes em diferentes condições edafoclimáticas, auxiliando na identificação de genótipos mais adaptados a ambientes específicos. A partir dessas informações, é possível prever o impacto de modificações no manejo agrícola sobre o desempenho radicular, promovendo práticas de agricultura de precisão mais eficientes e sustentáveis (Silva *et al.*, 2023).

A relação entre a arquitetura radicular e a tolerância ao estresse hídrico também tem recebido atenção significativa. Segundo Wasson *et al.* (2012), sistemas radiculares mais profundos são fundamentais para acessar água em camadas mais profundas do solo, proporcionando maior resiliência às culturas em períodos de seca prolongada. Esse tipo de adaptação é crucial para espécies cultivadas em regiões áridas, onde os recursos hídricos são frequentemente limitados.

Em outro estudo, Lynch e Wojciechowski (2015) destacaram que raízes com menor diâmetro não apenas promovem maior densidade radicular, mas também melhoram a eficiência na exploração do solo em ambientes com baixa fertilidade. Essa característica estrutural permite às plantas otimizar a absorção de nutrientes móveis, como o nitrogênio, mesmo em condições adversas.

A integração de práticas agrícolas conservacionistas, como a rotação de culturas, também afeta diretamente a morfologia radicular. Segundo Gregory *et al.* (2018),

sistemas de rotação bem planejados promovem o desenvolvimento de sistemas radiculares mais robustos e diversificados, o que melhora a exploração do solo e a eficiência na captação de nutrientes. Além disso, esses sistemas favorecem a saúde do solo, criando condições ideais para a interação entre raízes e microrganismos benéficos.

Os estudos recentes de Chimungu *et al.* (2019) ressaltam o papel das raízes laterais na adaptação a condições de estresse nutricional. Essas raízes são altamente ramificadas e atuam na exploração eficiente do solo em busca de nutrientes menos disponíveis, como fósforo e potássio. Aumentar a densidade de raízes laterais em cultivares comerciais pode ser uma estratégia eficaz para reduzir a dependência de fertilizantes químicos e promover a sustentabilidade agrícola.

Considerações Finais

A diversidade na morfologia radicular das espécies cultivadas constitui uma estratégia adaptativa crucial para otimizar a captação de nutrientes, especialmente em ambientes caracterizados por restrições hídricas e baixa disponibilidade nutricional. Os avanços recentes na fenotipagem radicular e na seleção genética destacam-se como ferramentas promissoras para a transformação das práticas agrícolas, possibilitando uma gestão mais eficiente dos recursos naturais e contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas produtivos.

Referências

- AGARWAL, S.; PANDEY, P.; SHARMA, V. Dynamics of nutrient flow in root morphology. **Plant Soil**, v. 450, n. 1, p. 103-120, 2024.
- ALMEIDA, D. S.; OLIVEIRA, A. R.; SILVA, J. P. Fixação biológica de nitrogênio em soja: Impacto na nutrição e produtividade. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 12, n. 3, p. 123-134, 2016.
- ALMEIDA, D. S.; SILVA, J. P.; LIMA, A. T. Compactação do solo e seus impactos no desenvolvimento radicular em sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, n. 1, p. 1-10, 2019.
- BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B. M.; HALLETT, P. D.; VALENTINE, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 1, p. 59-68, 2011.
- BRITO, G. G.; PEREIRA, F. S.; ALVES, F. C. Desenvolvimento radicular do milho em diferentes sistemas de manejo do solo. **Cadernos de Ciência Agrícola**, v. 9, n. 1, p. 45-52, 2017.

CASSOL, L. C.; LIMA, A. P.; MIQUELLUTI, D. J. Dinâmica de absorção de nutrientes em soja: Relação com o sistema radicular. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 2, p. 8 CHIMUNGU, J. G.; BURT, A. J.; LYNCH, J. P. Root anatomical phenes predict root penetration ability and biomechanical properties in maize (*Zea mays*). **Journal of Experimental Botany**, v. 70, n. 22, p. 6201-6210, 2019.9-97, 2019.

FERREIRA, M. A.; SANTOS, L. F.; PEREIRA, R. T. Genótipos adaptados ao estresse hídrico: Plasticidade e eficiência radicular em culturas anuais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 57, n. 4, p. 415-426, 2022.

GAMUYAO, R.; CHIN, J. H.; PASCUAL, L. et al. The protein kinase Pstol1 from traditional rice confers tolerance of phosphorus deficiency. **Nature**, v. 488, p. 535–539, 2012.

GREGORY, P. J.; ATKINSON, C. J.; BENGOUGH, A. G.; ELSE, M. A. Root phenomics and crop improvement: Integrating traits across the whole root system. **Journal of Experimental Botany**, v. 69, n. 6, p. 1041-1053, 2018.

HOSTETLER, C.; ZHANG, X.; JONES, R. Roots beyond the ground: Brace roots' role in maize stability and nutrient uptake. **Agricultural Science Journal**, v. 45, n. 4, p. 289-302, 2020.

LAVINSKY, A. O.; MALAVOLTA, E.; KUMAR, D. J. Root Morphological Characteristics in Nutrient Uptake Efficiency of Plants. **Journal of Root Research**, v. 10, p. 34-49, 2014.

LYNCH, J. P.; WOJCIECHOWSKI, T. Root architecture phenes for enhanced soil resource acquisition. **Plant Physiology**, v. 168, n. 2, p. 347-360, 2015.

LYNCH, J. P. Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: Tools for future crops. **Plant Physiology**, v. 182, n. 4, p. 1667-1681, 2019.

MENDES, R. L.; BARROS, C. A. Eficiência da absorção de fósforo em soja sob diferentes condições de solo. **Acta Agrônômica**, v. 27, n. 4, p. 567-580, 2020.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Micorrizas: 30 anos de pesquisa no Brasil**. Lavras: Editora UFLA, 2006.

NEUMANN, G.; MARTINOIA, E.; RAHMAN, M. M. Root exudation of organic acids: Impact on the availability of nutrients in the rhizosphere. **Plant and Soil**, v. 329, p. 1-25, 2010.

OLIVEIRA, C. A.; SILVA, A. B.; SOUSA, T. C. Aeration and nutrient uptake in maize brace roots under waterlogged conditions. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00953>. Acesso em: 5 nov. 2024.

RUBIO, T.; GALINDO, F. H.; RAMIREZ, J. S. Fine root adaptations in legumes: A pathway for nutrient acquisition in poor soils. **Field Crops Research**, v. 270, p. 108282, 2021.

SCHROEDER, J. I.; DELHAIZE, E.; BINDRABAN, P. S.; AHUJA, L. R. Improving Nutrient Use Efficiency in Plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 69, p. 275-302, 2018.

SILVA, F. P.; LOPES, M. A.; COSTA, J. L. Taxa de crescimento radicular e absorção de fósforo em milho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 48, n. 3, p. 215-222, 2018.

SILVA, F. P.; OLIVEIRA, T. J.; COSTA, J. A. Modelagem tridimensional da arquitetura radicular: avanços e aplicações na agricultura de precisão. **Agricultural Systems**, v. 212, p. 102892, 2023.

SMITH, S. E.; READ, D. J. **Mycorrhizal Symbiosis**. 3. ed. Cambridge: Academic Press, 2008.

WASSON, A. P.; REBETZKE, G. J.; KIRKPATRICK, J.; CHRISTIANSON, J. A.; RICHARDS, R. A. Soil water extraction by wheat. **Crop and Pasture Science**, v. 63, n. 10, p. 848-856, 2012.

ZHANG, Y.; HUANG, L.; WANG, J. Micorrhizal influence on root morphology in crop plants. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 156, p. 108-116, 2023.

ZHANG, Y.; LIU, H.; WANG, L. Enhancing nutrient availability through biofortified root systems. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 70, n. 3, p. 345-358, 2024.

CAPÍTULO 8

MUDANÇAS CLIMÁTICAS E ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO

CLIMATE CHANGE AND MITIGATION STRATEGIES

DOI: <https://doi.org/10.56001/24.9786500981315.08>

Submetido em: 27/11/2024

Revisado em: 28/11/2024

Publicado em: 29/11/2024

Magna Maria Macedo Nunes Costa

Embrapa Algodão

Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas, Campina Grande-PB

<http://lattes.cnpq.br/5347094641181559>

Resumo

Nos últimos anos, os efeitos adversos da mudança climática sobre as propriedades do solo no setor agrícola têm se tornado uma realidade preocupante em todo o mundo. Os estresses abióticos induzidos pela mudança climática, tais como salinidade, seca e flutuações de temperatura, estão interferindo negativamente nas respostas fisiológicas das culturas, na produtividade e na produção total, o que ultimamente configura uma séria ameaça à segurança alimentar global e aos agroecossistemas. A aplicação de adubos e agrotóxicos contribui para deterioração do ambiente e mudanças rápidas no clima. Portanto, estratégias mais cuidadosas, ecológicas e sustentáveis são requeridas para mitigar o impacto da mudança climática sobre o setor agrícola. Esta publicação mostra os impactos recentemente relatados dos estresses abióticos sobre a agricultura, juntamente com duas estratégias recentes de mitigação, o biochar e os bioestimulantes. Esse capítulo de livro é uma tradução do artigo intitulado “An overview of climate change impacts on agriculture and their mitigation strategies”, publicado na revista Agriculture.

Palavras-chave: culturas; biochar; bioestimulantes; solo

Abstract

In recent years, the adverse effects of climate change on soil properties in the agricultural sector have become a worrying reality worldwide. Climate change-induced abiotic stresses, such as salinity, drought and temperature fluctuations, are negatively interfering with crop physiological responses, productivity and overall production, which ultimately poses a serious threat to global food security and agroecosystems. The application of fertilizers and pesticides contributes to environmental deterioration and rapid climate change. Therefore, more careful, ecological and sustainable strategies are required to mitigate the impact of climate change on the agricultural sector. This publication presents the recently reported impacts of abiotic stresses on agriculture, together with two recent mitigation strategies, biochar and biostimulants. This book chapter is a translation of the article entitled “An overview of climate change impacts on agriculture and their mitigation strategies”, published in the magazine Agriculture.

Keywords: crops; biochar; biostimulants; soil

Introdução

Mudança climática se refere a uma mudança a longo prazo e significativa nas medidas relacionadas ao clima, tais como chuva, temperatura, vento ou padrão de neve. O aquecimento global e a emissão de gases do efeito estufa (GEE) são considerados os principais fatores responsáveis por acelerar, de modo adverso, o grau de mudança climática. Devido ao aumento contínuo das atividades antropogênicas, a temperatura média global aumentou 0,9°C desde o século XIX e a expectativa é que o aumento chegue a 1,5°C até 2050. Aumentos múltiplos e contínuos nas emissões de GEE estão afetando fortemente os ecossistemas terrestres, de água doce e marinhos, por causar perdas substanciais e irreversíveis. Os GEE bloqueiam a transmissão de radiações infravermelhas que tentam sair da atmosfera e, dessa forma, retêm o calor, como em uma “casa-de-vegetação”. As principais fontes de GEE são queima de combustíveis fósseis, uso de fertilizantes nitrogenados, manejo inadequado do solo, campos alagados de arroz, conversão de biomas nativos em terras agrícolas, queima de biomassa, pecuária e esterco. A mudança climática trará impactos significativos na agricultura por meio de efeitos diretos e indiretos sobre as culturas, os solos, a pecuária e as pragas. Embora a mudança climática seja um processo lento, envolvendo mudanças relativamente pequenas na temperatura e na precipitação durante longos períodos, essa mudança lenta no clima, no entanto, influencia vários processos no solo, particularmente aqueles relacionados à sua fertilidade. Os efeitos da mudança climática sobre os solos estão ligados principalmente às alterações nas condições de umidade, na temperatura e nos níveis de CO₂. É esperado que a mudança climática global proporcione efeitos variáveis sobre importantes processos e propriedades do solo. Nesse contexto, é importante conhecer esses efeitos para a restauração da fertilidade e da produtividade. Os principais efeitos da mudança climática sobre os solos são na elevação do CO₂ e no aumento da temperatura e da salinidade (Bibi e Rahman, 2023).

A agricultura é vulnerável à variabilidade do clima, e os aumentos na temperatura e no CO₂, bem como a mudança no padrão de chuvas, associados à mudança climática, podem levar a um declínio considerável na produção agrícola. As mudanças na temperatura, na umidade e nos ciclos de chuva-seca e congelamento-descongelamento pode levar às alterações no crescimento e na fisiologia dos microrganismos do solo. As mudanças nos parâmetros ambientais induzidas pelo clima podem de fato influenciar a estrutura e a função da comunidade microbiana do solo, e modificar, por exemplo, o nível

de interação entre os microrganismos, requerido para a degradação de poluentes orgânicos no solo, estoques de carbono orgânico no solo e propriedades do solo tais como pH, capacidade de troca de cátions (CTC), capacidade de retenção de água (CRA) e estoque de nutrientes. Também, eventos climáticos extremos como secas, ondas de calor e chuvas pesadas que levam ao alagamento têm aumentado nas décadas passadas, aumentando, às taxas alarmantes, a lixiviação, a erosão e o escoamento. Aumentar a produção agrícola para atender à crescente demanda devido ao crescimento populacional, tendo como pano de fundo as ameaças das mudanças climáticas, é uma tarefa desafiadora. Portanto, se requiere mais atenção para a pesquisa de adaptação e mitigação. Nas últimas décadas, as tecnologias agrícolas têm tido sucesso em erradicar a fome em muitas partes do mundo, mas, em virtude dos produtos químicos, o que levanta mais preocupações com o ambiente, a saúde e a agricultura futuros. Nos últimos anos, sistemas e tecnologias externas à propriedade, como os fertilizantes químicos (N, P e K), são aplicados excessivamente para satisfazer os requerimentos nutricionais das plantas para aumentar a produtividade agrícola em todo o mundo. O uso de fertilizantes químicos tem causado mais danos do que benefícios, numa perspectiva de longo prazo. Portanto, o setor agrícola moderno necessita de mais estratégias limpas e verdes para melhorar a produtividade das culturas e mitigar os impactos das mudanças climáticas simultaneamente (Bibi e Rahman, 2023).

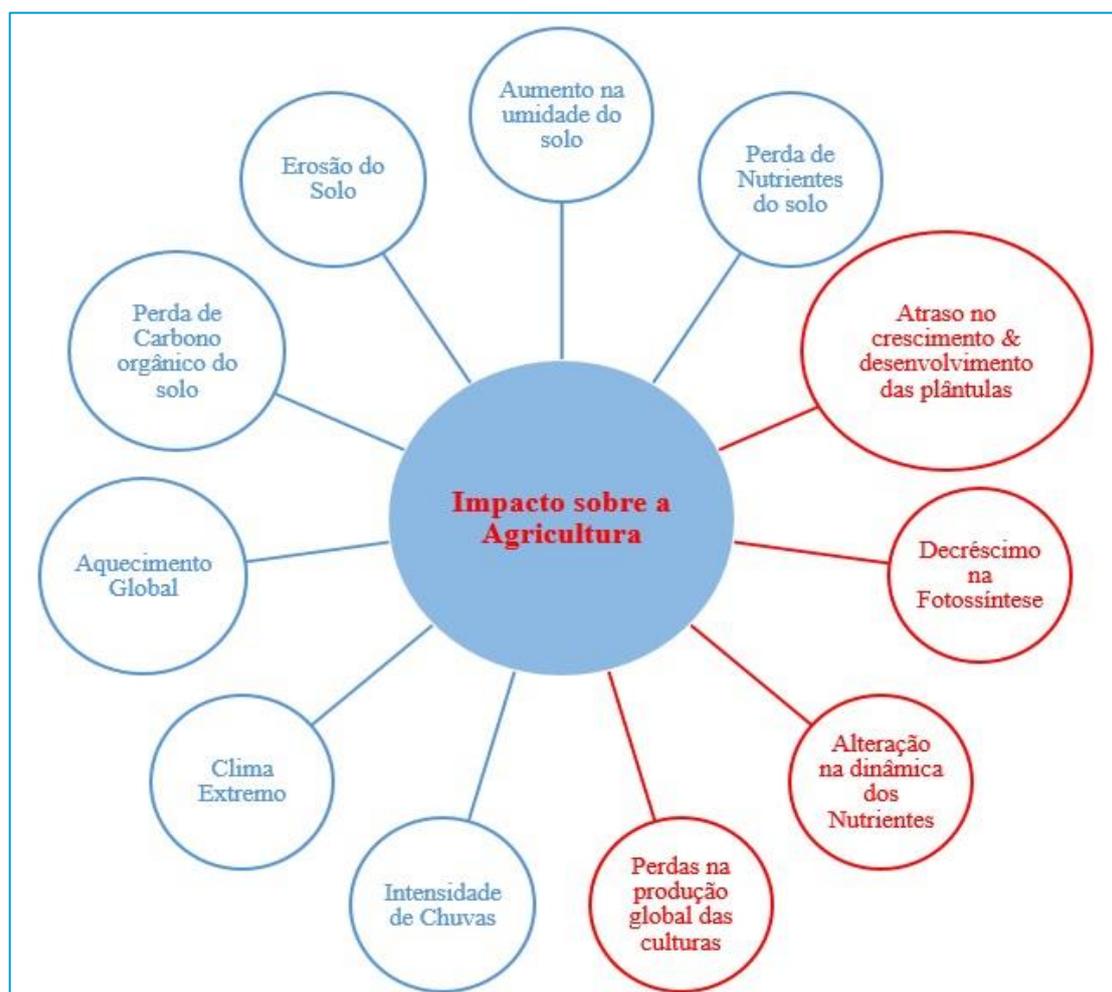
Vários bioinsumos surgiram para combater o uso de produtos químicos na agricultura, tais como biochar, bioestimulantes e biofertilizantes. Avanços recentes na pesquisa têm fornecido evidência de que esses bioinsumos têm potencial para melhorar as propriedades do solo e a produção agrícola, ao mesmo tempo em que compensam a emissão de GEE a níveis significativos. Esses bioinsumos minimizam os efeitos adversos da mudança climática e agem como substitutos de produtos químicos. Além do mais, eles atraem a atenção para produtos naturais como substitutos de produtos sintéticos.

Em esforços para resumir o potencial das inovações biológicas para aumentar simultaneamente a fertilidade do solo e a produtividade das culturas, ao mesmo tempo em que se traga soluções para o meio ambiente, destaca-se duas inovações: biochar e bioestimulantes. Neste artigo, fornece-se uma avaliação, baseado em conhecimentos recentes, sobre o potencial de várias ferramentas biológicas, como o biochar e os bioestimulantes, como bioinsumos verdes para conter o impacto da mudança climática sobre a atmosfera e a agricultura.

O Impacto da mudança Climática sobre a Agricultura e as Propriedades do Solo

No setor agrícola, as flutuações no clima tais como no padrão de chuvas, na elevação contínua de dióxido de carbono e na temperatura média, têm levado a um aumento na frequência de eventos extremos que causam desastres como alagamento e seca, representando uma séria ameaça à produtividade global das culturas agrícolas (Figura 1). A variação na temperatura e na precipitação tem efeitos diretos sobre o crescimento e o tempo para maturação das colheitas, devido ao fato de que as plantas são adversamente sujeitas a vários estresses bióticos e abióticos. Esses estresses são responsáveis por perdas de 30% a 50% da produtividade agrícola em todo o mundo. Em adição a essas perdas de produtividade, a mudança climática é também uma ameaça em termos de expansão significativa na gama de pragas e patógenos que podem levar a um aumento na frequência e na severidade de destruição das culturas por esses agentes.

Figura 1 – Impacto dos extremos ambientais induzidos pelo clima sobre a agricultura, o solo e as culturas

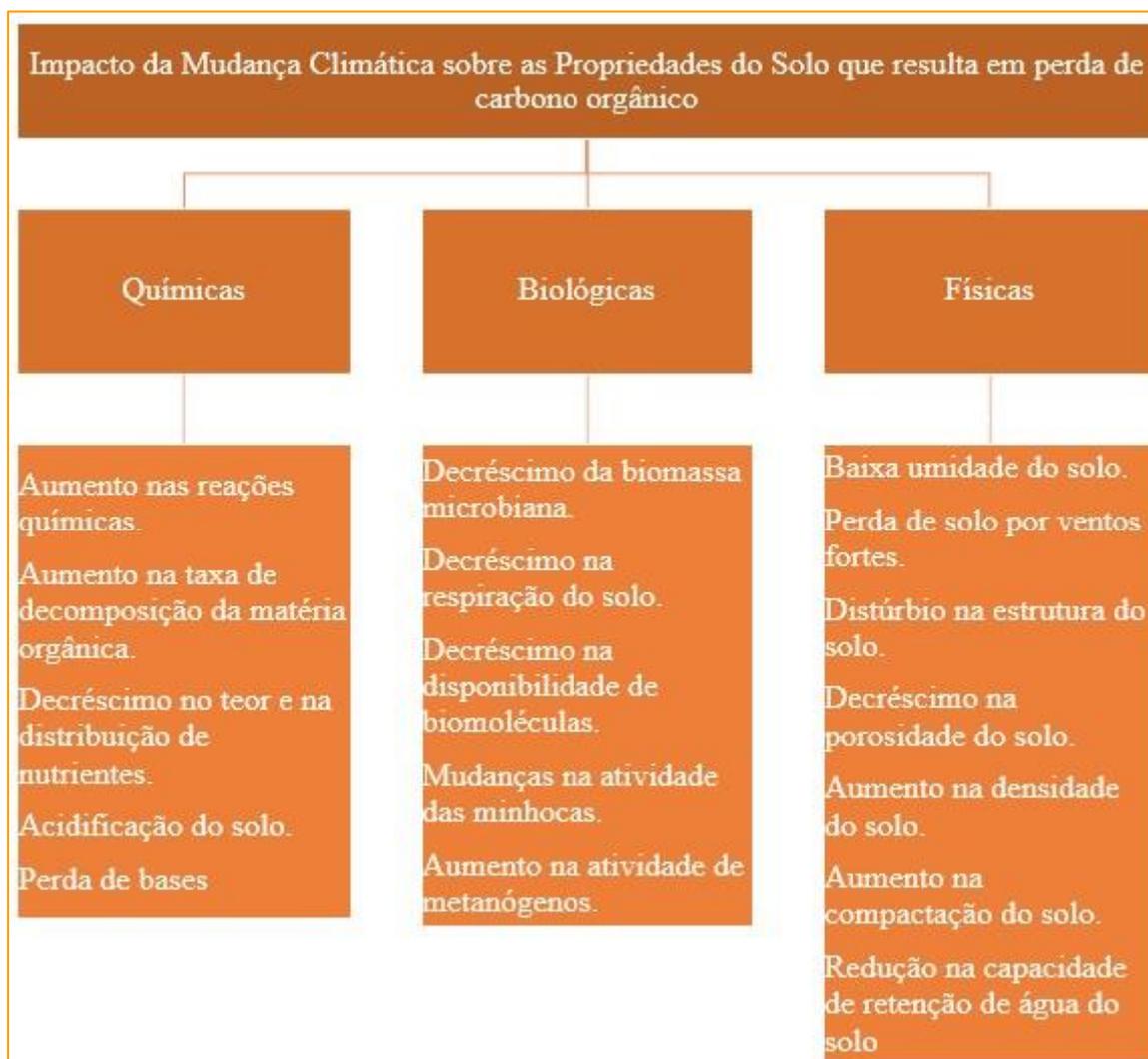


Com o aumento da população humana e da industrialização, espera-se aumentar a frequência e as consequências do aquecimento global, o que não se limitará a nenhuma região em particular, mas acabará por ser distribuído em todos os ecossistemas globais. Esses impactos perigosos da mudança climática sobre a produção das culturas podem comprometer e pôr em risco a segurança alimentar em todo o mundo. Daí a insegurança alimentar e a mudança climática serem consideradas dois dos principais desafios do século XXI.

Além de ter efeitos diretos sobre as plantas, a mudança climática também afeta adversamente o solo. Flutuações nas concentrações de dióxido de carbono na atmosfera; taxas, modelos e quantidades de precipitação e aumento na temperatura estão modificando o sistema solo-planta, por influenciarem a taxa de decomposição e os níveis de carbono orgânico no solo. A estrutura, a fertilidade, a população e os processos microbianos dependem da disponibilidade de carbono orgânico no solo.

O efeito combinado da temperatura e da umidade determina o processo de transformação dos minerais em compostos do solo. Frequências de precipitação e temperatura sazonal também afetam as propriedades hidrofísicas do solo, por mudarem o regime de água nele. As propriedades físicas do solo, tais como textura, estrutura (forma e estabilidade dos agregados), densidade de massa, porosidade e distribuição espacial de poros de diferentes tamanhos, afetam significativamente as propriedades hidrológicas (condutividade hidráulica, retenção de umidade). Essas propriedades hidrofísicas influenciam grandemente os processos químicos e biológicos do solo, tendo ultimamente um grande impacto sobre a fertilidade e a produção das culturas (Figura 2).

Figura 2 – Deterioração do solo por vários mecanismos associados a extremos climáticos.



Descobrir o grau de influência da mudança climática sobre as propriedades físicas do solo é um processo bastante complexo. Os impactos diretos mais comuns e significativos do clima sobre a estrutura do solo são sobre a capacidade de destruição das gotas das chuvas, a infiltração de água e o escoamento superficial. Por outro lado, os efeitos indiretos resultam das flutuações nos padrões de vegetação e nas propriedades biológicas do solo tais como a sensibilidade de térmitas, cupins e micróbios do solo às mudanças climáticas. Textura, densidade de massa e teor de matéria orgânica do solo dependem diretamente da condição climática. O aumento do nível de dióxido de carbono na atmosfera reduz grandemente a matéria orgânica do solo pelo aumento da atividade microbiana. Portanto, resulta em mais rotatividade de carbono para a atmosfera pela aceleração do “feedback” positivo no ciclo global de carbono resultante do aumento na

temperatura global. Adicionalmente, a perda de matéria orgânica devido à atividade microbiana do solo e à erosão resulta em um aumento na densidade de massa do solo, o que, por sua vez, aumenta a sua compactação. A densidade de massa e a compactação do solo inibem o crescimento das raízes das plantas e, coletivamente, resultam em baixas produções das plantas cultivadas.

Eventos climáticos extremos também afetam as propriedades químicas do solo, tais como pH; teor e distribuição de sais solúveis, nutrientes e carbonatos; capacidade de troca de cátions e percentagem de saturação por bases. Por aumentar a precipitação e a taxa de intemperismo, esses fenômenos levam à aceleração da lixiviação e resulta na acidificação do solo. Um pH ácido facilita a mobilização de metais pesados, deixando o solo esgotado de cátions básicos. O solo de locais mais áridos e quentes possuem baixos níveis de carbono orgânico, nitrogênio e fósforo. A matéria orgânica do solo é um dos fatores mais importantes para medir a sua eficiência. A decomposição biológica ajuda no aumento da matéria orgânica do solo, e a taxa de decomposição pelos microrganismos aumenta com o aumento da temperatura. No entanto, o aumento não é um processo contínuo e, depois de um certo limite, aumentos adicionais de temperatura resultam em mudanças na fisiologia microbiana por reduzir a eficiência no uso de carbono. Mudanças na temperatura, na umidade e nos ciclos de umidade-seca e congelamento-descongelamento podem levar a alterações no crescimento e na fisiologia dos microrganismos do solo. Mudanças induzidas pelo clima nos parâmetros ambientais podem de fato influenciar tanto a estrutura como a função das comunidades microbianas do solo e modificar, por exemplo, o nível de interação entre os microrganismos requerido para a degradação de poluentes orgânicos no solo.

Respostas Fisiológicas das Culturas aos Vários Parâmetros de Mudança Climática

O crescimento e a produção das plantas cultivadas dependem de vários fatores importantes tais como temperatura e nível de CO₂ da atmosfera, quantidade e modelo de precipitação, salinidade e acúmulo de metais pesados no solo. Com o aumento na temperatura global, mudanças significativas em vários parâmetros hidrológicos têm sido constatadas, tais como na evapotranspiração, nas chuvas, no escoamento das águas e na umidade do solo. A maior parte das culturas tem uma faixa bastante estreita de sobrevivência a altas temperaturas (40°C – 45°C). É um fato bem conhecido e

estabelecido que as enzimas dependem de temperaturas ótimas para trabalhar, e a falha de somente um único sistema enzimático crítico pode interromper o crescimento das culturas ou dos organismos. Altas temperaturas ou estresse por calor estão associados com vários mecanismos fisiológicos das plantas cultivadas, tais como injúria celular, peroxidação de lipídeos das membranas e estresse oxidativo. Além do mais, os níveis ótimos de temperatura são diferentes para as mais variadas plantas. Por exemplo, temperatura acima de 35°C danifica a cultura do arroz e os pistilos de sorgo e milho. Da mesma forma, uma perda na produtividade do trigo ocorre a altas temperaturas. A exposição das culturas a altas temperaturas durante diferentes estágios de desenvolvimento fornece diferentes resultados. Cultivos de arroz que enfrentam estresse por calor durante o estágio de desenvolvimento dos grãos é mais afetado do que em outros estágios. Estresse por calor durante a antese inibe a liberação do grão-de-pólen e faz cair o número de grãos. Estresse térmico durante o estágio de desenvolvimento reprodutivo leva a uma perda significativa na produção da cultura, pois é o estágio em que o grão-de-pólen e o pistilo estão suscetíveis às altas temperaturas. As culturas possuem vários mecanismos para resistir e minimizar as perdas durante o florescimento, tais como aumento na taxa de transpiração para criar um ambiente resfriado ao redor das plantas. Entretanto, às altas temperatura, as plantas preferem usar mais energia para a manutenção e a respiração, o que resulta em um comprometimento no seu crescimento.

De acordo com estimativas, a cada 1°C de aumento na temperatura, a produção agrícola pode se reduzir significativamente de 5% a 10% no futuro. Altas temperaturas obrigam as plantas a completar seu ciclo de vida em menos tempo que o normal, diminuindo o tempo de reprodução e, ultimamente, resultando em uma considerável perda de produção. Faixas de temperatura altas causam declínio na produção de arroz e soja, por aumentar a respiração noturna.

O aumento da salinidade é também uma grande ameaça à produção das culturas. Essa situação adversa tem aumentado em terras agrícolas costeiras, resultantes do aumento no nível do mar ao longo dos anos. A água se move no solo em direção às raízes via osmose, e esse processo depende dos níveis de sais no solo e nas plantas. Quando os níveis no solo são maiores do que nas raízes, a água é puxada das últimas para o primeiro, e esse fato pode causar redução na produtividade ou até mesmo matar as plantas. A salinidade também afeta a absorção de nitrogênio pelas raízes, o crescimento e a reprodução das plantas. As altas temperaturas e as baixas precipitações aumentam a taxa de evapotranspiração nas culturas, o que, por sua vez, resulta em acúmulo de sais na

superfície do solo. Dessa forma, a água subterrânea utilizada para irrigação fica salobra e rica em sais solúveis, tais como Na^+ e Cl^- , e menores em Ca^{2+} , K^+ e NO_3^- . O estresse salino hiper-ionizado causa danos oxidativos e comprometimento metabólico nas culturas. Os altos níveis de Cl^- também afeta a condutividade elétrica. Para algumas culturas, níveis acima de 2 dS m^{-1} limitam o crescimento e a produção. Além disso, altas salinidade e temperatura têm sido observadas afetar as respostas fisiológicas das culturas de várias maneiras, tais como por inibição da fotossíntese e fechamento dos estômatos, redução do teor de água e do potencial osmótico, desbalanceamento de nutrientes e mudança de osmólitos.

Com o aumento da industrialização, da urbanização, da mineração e do uso de agroquímicos, fontes naturais como água e solo estão sendo severamente poluídas com metais pesados tais como níquel, cobre, cádmio, chumbo, cobalto e cromo. Esses metais constituem uma séria ameaça aos agroecossistemas, com efeitos potencialmente tóxicos sobre as plantas cultivadas. O risco de contaminação e a proporção de metais que causam toxidez no solo determinam o efeito ativo no ambiente. A mudança climática afeta a biodisponibilidade e a mobilidade dos metais pesados no solo. Uma alta temperatura média aumenta o processo de mobilização e perturba o equilíbrio ambiental natural. A mudança climática também leva à acidificação do solo, e a toxicidade dos metais pesados piora o efeito da acidificação uma vez que esses elementos diminuem ainda mais a fotossíntese e vários processos fisiológicos das plantas cultivadas.

O níquel é um elemento que tem um impacto direto sobre a germinação de sementes de várias plantas cultivadas, afetando as atividades enzimáticas da amilase, da protease e da ribonuclease. Nesse caso, afeta significativamente a digestão e o transporte de reservas tais como carboidratos e proteínas durante a germinação das sementes. A toxicidade por níquel também afeta vários processos físico-químicos, causando redução na altura das plantas, no comprimento das raízes, na biomassa e no teor de clorofila. Também causa vazamento de eletrólitos, redução nos teores de clorofila e acumulação de vários cátions tais como K^+ , Na^+ e Ca^{2+} . A toxicidade por chumbo afeta negativamente vários processos morfológicos e fisiológicos das plantas cultivadas, tais como germinação de sementes; desenvolvimento das plântulas; alongação das raízes; transpiração; crescimento; teores de clorofila, proteínas e água; absorção de nutrientes e abertura estomática. Os solos poluídos com chumbo provocam inibição no crescimento das plântulas, possivelmente por meio de alterações em mecanismos tais como aumento da

peroxidação de lipídeos e da ativação dos ciclos da superóxido dismutase e da glutathione ascorbato.

A toxicidade por cobre afeta as plântulas na cultura do girassol, por induzir a geração de espécies reativas de oxigênio e abaixar a atividade da catalase. Também interrompe a germinação das sementes via abaixamento da regulação da atividade da α -amilase e por afetar a absorção de água, o transporte de reservas nutritivas e o metabolismo geral. Cádmio e cobalto também afetam o processo de germinação, causando retardo. A toxicidade por cádmio está associada ao transporte prejudicado de reservas nutritivas e aos danos às membranas. Também afeta fortemente a percentagem de germinação, o crescimento do embrião e a distribuição de biomassa. A toxicidade por cromo resulta na redução do crescimento das culturas; no abaixamento nos teores de clorofila, proteína e prolina e na maior absorção do metal.

Mudança Climática e Estratégias de Mitigação para Melhorar a Agricultura

Na agricultura moderna, as estratégias verdes precisam combinar com a melhoria da saúde do solo, os rendimentos das colheitas e os desafios ambientais associados às mudanças climáticas. Para melhorar a fertilidade do solo e o crescimento das plantas, várias opções estão disponíveis, as quais variam desde os corretivos tradicionais até as soluções inovadoras. Duas dessas soluções têm ganhado imensa atenção: o biochar e os bioestimulantes. O potencial único dessas estratégias é que, além de melhorar a fertilidade do solo e os rendimentos das colheitas, ao mesmo tempo têm a capacidade de mitigar os impactos da mudança climática sobre a agricultura e o meio ambiente.

- **Biochar**

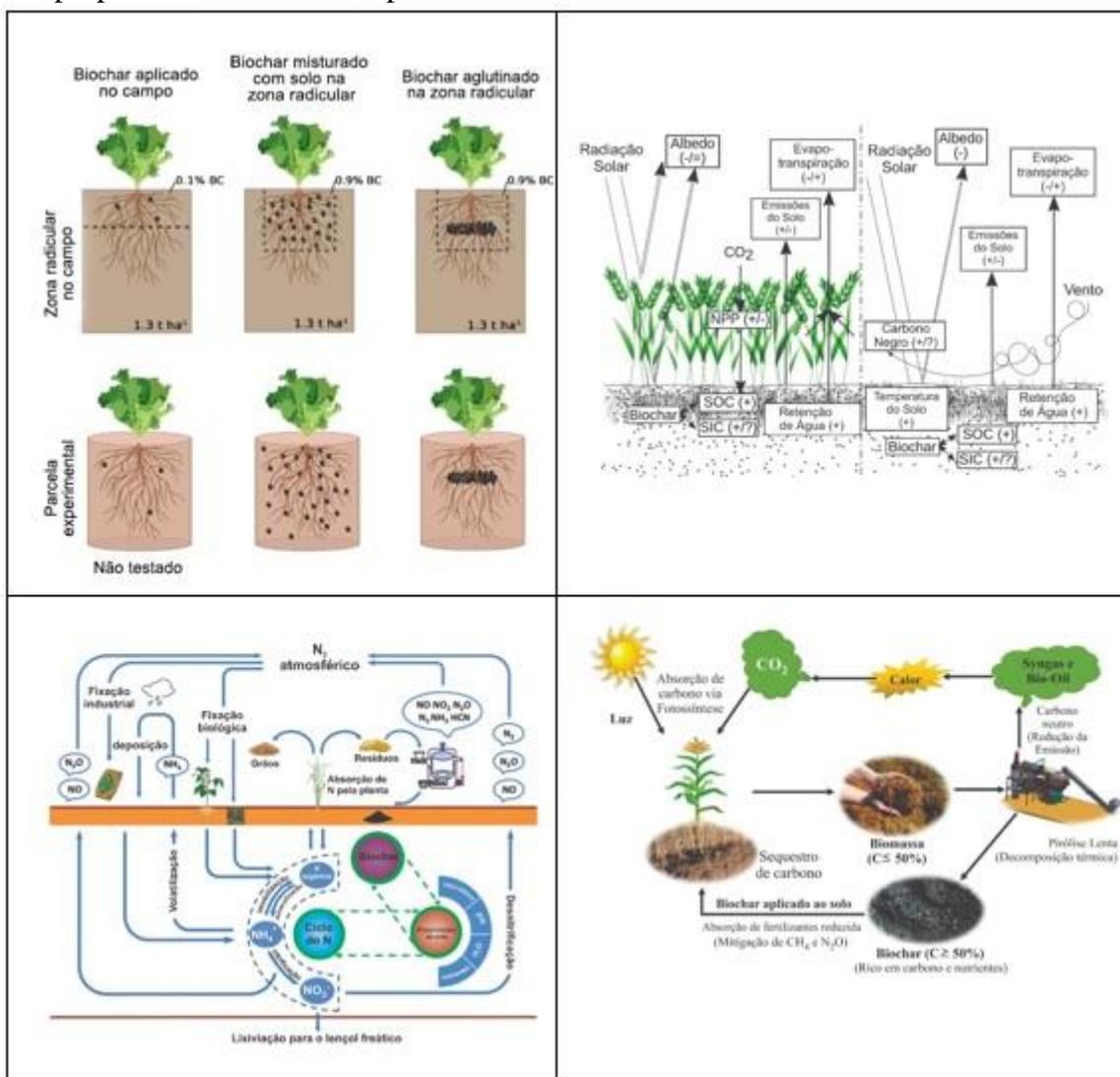
Biochar é um material à base de carbono, sólido, escuro e estável, composto principalmente de carbono, minerais, compostos voláteis e umidade. Por milhares de anos, a pirólise de biomassa em biocombustíveis e biochar tem apresentado uma capacidade potencial de sequestrar CO₂ da atmosfera, bem como de corrigir solos. O biochar é um material poroso e sólido, que resulta da carbonização da biomassa na ausência de oxigênio e às altas temperaturas (400°C). É considerado uma ferramenta significativa na mitigação dos efeitos da mudança climática porque seu papel é reduzir as emissões de GEE do solo e sequestrar o carbono em uma forma mais estável. As propriedades do biochar dependem grandemente da temperatura de pirólise; biochar

produzido a altas temperaturas pirólicas, tais como maiores que 500°C, melhoram a porosidade e a densidade de massa de forma significativa. Já o biochar produzido a temperaturas pirólicas menores que 500°C, têm um maior impacto sobre a diversidade de fungos e bactérias do solo. Especialmente em solos de textura pesada, ele afeta a diversidade bacteriana, enquanto que, em solos de textura fina, afeta mais a diversidade de fungos. No entanto, juntamente com vários efeitos benéficos, a aplicação de biochar causa impactos negativos de curto prazo sobre a população de minhocas. Dessa forma, pesquisas futuras são requeridas para mitigar esse impacto sobre a atividade benéfica das minhocas no solo.

O biochar melhora a eficiência do uso de fertilizantes e, dessa forma, reduz o ônus econômico e ambiental da fabricação. O uso eficiente de fertilizantes baseado no biochar pode evitar uma parte da fabricação desses insumos bem como a emissão de GEE associada. Os fertilizantes que têm biochar como base podem aumentar significativamente a produtividade das culturas em solos que não são responsivos aos fertilizantes comuns.

O biochar tem uma capacidade gigantesca de sequestrar CO₂ e, ao mesmo tempo, impedir a liberação do carbono de volta à atmosfera depois de sua decomposição (Figura 3B). Com essa capacidade, cerca de 2,5 gigatoneladas de CO₂ podem ser sequestradas anualmente. A decomposição mais lenta do biochar, em comparação à biomassa, é a causa do seu potencial para mitigar os impactos da mudança climática, uma vez que abaixa as taxas de retorno do carbono fixado fotossinteticamente para a atmosfera. A diferença entre as taxas de decomposição do biochar e da biomassa determina criticamente o estoque líquido de carbono disponível no solo que foi acumulado ao longo do tempo. O biochar disponibiliza maiores estoques de carbono ao solo à medida em que o tempo passa, em comparação à biomassa. O carbono do biochar incorporado, nesse caso, é considerado como uma redistribuição do carbono da fonte da biomassa, com a habilidade para, persistentemente, fornecer maior sequestro de C e influenciar o balanço líquido dos GEE. Apesar dos vários benefícios potenciais do biochar, a sua aplicação ainda tem alguns gargalos a serem resolvidos. Os riscos à saúde associados à inalação de partículas pretas de carbono, liberadas durante a formação do biochar, são uma das preocupações à saúde e ambientais que requer mais atenção e manejo.

Figura 3 – Papel potencial do biochar nas alterações do solo e na produtividade das culturas, via vários mecanismos: (acima, à esquerda): aumento na produtividade das culturas via alteração na zona radicular induzida pelo biochar, (acima, à direita): efeito do biochar sobre o clima de um campo cultivado por induzir efeitos positivos no aumento do carbono orgânico e inorgânico do solo, na retenção de água e no decréscimo da evapotranspiração, (abaixo, à esquerda): mecanismo de melhoramento no nitrogênio do solo, associado ao biochar, (abaixo, à direita): papel geral do biochar no melhoramento das propriedades do solo e na produtividade das culturas.



Fonte: Bibi e Rahman (2023)
Diagramação: Sérgio Cobel da Silva

O biochar é feito de compostos com variadas cinéticas de decomposição no solo, e essas taxas vão se tornando cada vez mais lentas com o decorrer do tempo. Também, os microrganismos não podem digerir o biochar completamente; portanto, as alterações no solo provocadas pelo biochar são consideradas uma fonte de agentes permanentes para o sequestro de carbono. Dependendo das propriedades físico-químicas do biochar, ele pode oferecer um caminho sustentável para a obtenção de matéria-prima adequada para o

paradigma da economia circular. A aplicação de biochar, como um enriquecimento para o solo, pode compensar a emissão de CO₂ da terra em 12% ao ano. Além do mais, juntamente com a melhora na saúde do solo e na produtividade das culturas, ele tem a habilidade de minimizar em 1/8 as emissões anuais de CO₂. Essa estratégia de mitigação pode reverter o aquecimento global e, significativamente, ajudar no desenvolvimento de tecnologia negativa de carbono para um futuro viável para a civilização humana.

O biochar afeta o teor de matéria orgânica nativa do solo por, significativamente, variar os estoques de carbono não pirogênico. O caminho pelo qual o biochar pode impactar a matéria orgânica do solo inclui a redução da quantidade de detritos em comparação à biomassa adicionada diretamente, aumentando a produção de biomassa das plantas e alterando a taxa de estabilização, humificação e matéria orgânica. O biochar também tem um impacto sobre o melhoramento da produção das culturas via fornecimento de nutrientes, alteração no pH do solo, aumento da capacidade de troca de cátions (CTC) do solo, melhoramento da eficiência do uso de fertilizantes e aumento na capacidade de retenção de água em solos argilosos e arenosos (Figura 3). A aplicação de biochar também melhora as reações químicas mediadas por micróbios e a atividade enzimática do solo (Figura 3C). As aplicações de biochar ao solo também têm o potencial de minimizar o escoamento superficial e a erosão do solo. Uma meta-análise sistemática revela a mitigação da erosão do solo em 16% e do escoamento superficial em 25% após a correção do solo com biochar. Esse efeito é considerado ser mais forte em zonas tropicais do que em sub-tropicais.

Além disso, o biochar também desempenha um importante papel na mitigação dos impactos da mudança climática através de vários outros mecanismos secundários, tais como desempenhando um papel na redução das emissões de óxido nitroso e metano do solo. A pirólise da biomassa a biochar pode evitar processos tais como decomposição e combustão de biomassa, que contribuem para a emissão de NO_x e metano na atmosfera. A aplicação de biochar pode abaixar as emissões entre 50% e 80% em um oxissolo ácido de savana e entre 70% a 80% em solos ligeiramente ácidos a neutros. As emissões anuais de óxido nitroso, evitadas pela aplicação de biochar, podem ter um fator de redução (RN) de 25%. A China, que é um emissor significativo de GEE, tem usado o biochar para compensar as emissões totais de CH₄ e N₂O pelas terras agrícolas desse país, via pirólise de resíduos a biochar. A aplicação de biochar em combinação com dicianidamida reduz as emissões cumulativas de N₂O entre 69% e 70% e as emissões de CO₂ entre 30% e 43%. Essa redução nas emissões está associada à complexidade da rede de bactérias.

Similarmente, há redução nas emissões de metano do solo via aplicação de biochar. No entanto, mais pesquisas são necessárias para estimar as reduções proporcionais nas emissões de óxido nitroso ou metano em várias condições de solos.

Em resumo, o biochar tem um alto potencial de mitigar os impactos da mudança climática sobre o solo, a agricultura e a produção das culturas. O biochar possui mais benefícios potenciais sobre os perigos para o solo em comparação a outras tecnologias de manejo e mitigação. No entanto, uma análise cuidadosa é requerida na produção de biochar em larga escala, pois ele pode atrair empresas, indústrias e empresários para estocar carbono de uma forma estável para o comércio, resultando, desse modo, em mais inseguranças alimentares. Com o advento da pesquisa nesse campo, há também uma necessidade extrema para cuidar da formulação de políticas, dos projetos, dos protocolos, do monitoramento dos projetos e da consultoria para extensões agrícolas, com o objetivo de maximizar a produção e evitar quaisquer resultados negativos associados com práticas pobres de irrigação e suas implicações.

- **Bioestimulantes**

Mais recentemente, os bioestimulantes têm sido reportados como uma entre várias estratégias de mitigação significativas e potenciais para ajudar as plantas a desenvolverem resistência contra vários estresses abióticos ambientais resultantes da condição de rápida mudança climática. Vários estudos recentes têm mostrado o tremendo potencial dos bioestimulantes na agricultura, por eles fornecerem ajuda às plantas contra estresse induzido pela mudança climática, tais como salinidade, seca e temperatura. Os bioestimulantes são uma das várias estratégias biológicas emergentes com potencial para mitigar os estresses bióticos e abióticos em plantas, induzidos pelo clima, sem comprometer a saúde do solo, o crescimento das plantas e o meio ambiente. Os bioestimulantes são micróbios, compostos orgânicos ou amálgamas dos dois, que podem ajudar na regulação do crescimento e de certos comportamentos da planta via alterações aos níveis molecular, bioquímico fisiológico e anatômico. Os bioestimulantes podem agir como uma estratégia de mitigação promissora no recente cenário de produção das culturas, pois eles são relatados funcionar através de vários modos de ação devido à natureza diversa e composição variada desses compostos bioativos. Os bioestimulantes podem ser amplamente categorizados em várias classes tais como extratos botânicos incluindo ervas/algas marinhas, aminoácidos, hidrolisados de proteínas, vitaminas, antioxidantes, produtos microbianos, agentes anti-transpirantes, quitinas e ácidos

húmicos e fúlvicos, juntamente com seus derivados. A aplicação de bioestimulantes em quantidades muito pequenas tem o potencial de induzir resistência contra estresses, e essa qualidade faz essa classe ser diferente dos fertilizantes e adubos do solo. Os bioestimulantes têm a habilidade de contribuir na manutenção do balanço ecológico do agroecossistema, por reduzir o uso de fertilizantes químicos, agrotóxicos e metais pesados nas práticas agrícolas. Junto de sua tremenda habilidade de aumentar os níveis de produção, os bioestimulantes também têm sido reportados pelo seu papel em reduzir a emissão de GEE, por decrescer o consumo de fertilizantes no setor agrícola. Extratos de ervas marinhas podem reduzir significativamente a liberação de GEE por suplementar o uso de fertilizantes sintéticos no cultivo de cana-de-açúcar, podendo compensar 260 kg de equivalente de CO₂ por Mg de produção de cana por ha com a aplicação foliar de 5% das necessidades da planta com esse produto. As respostas induzidas pelos bioestimulantes diferem entre as espécies de plantas, dependendo das modificações morfológicas provocadas pela expressão dos genes, do modo de aplicação e das respostas dos fitormônios. Os bioestimulantes têm um extraordinário potencial para mitigar os estresses abióticos adversos tais como salinidade, seca, calor ou frio, induzidos por mudanças nas condições climáticas, sem comprometer a qualidade, a produtividade e a produção das plantas cultivadas.

Em resumo, o uso de bioestimulantes é uma estratégia verde de mitigação emergente que tem grande habilidade para combater a escassez de água ou seca, a salinidade do solo e da água, bem como os estresses nas plantas associados, mas é também uma prática segura para maximizar a produtividade e o valor nutricional das culturas. No entanto, o modo de ação associado aos bioestimulantes tem sido frequentemente caracterizado apenas em estudos de modelagem, e seu entendimento ainda é limitado sob condições de campo. Há espaço significativo para pesquisa em aplicações de bioestimulantes nos sistemas culturais em condições de campo para o entendimento do impacto dos fatores externos sobre as aplicações práticas na agricultura.

Considerações Finais

O cenário climático incerto impacta de modo negativo a agricultura e é uma causa de preocupação para a segurança alimentar global. As estratégias de mitigação para compensar o impacto deletério induzido pelo clima sobre a produtividade agrícola, como o biochar e os bioestimulantes, têm potencial para minimizar significativamente o efeito desfavorável sem comprometer a sustentabilidade ambiental. O planejamento e a

aplicação dessas estratégias de mitigação, em uma abordagem interdisciplinar, podem salvar o futuro dos agroecossistemas e serem usados como ferramentas biológicas para superar os impactos imprevisíveis da mudança climática na agricultura. Em particular, a formulação de políticas para produção em larga escala e riscos à saúde devido à liberação de partículas de carbono negro no ar durante a formação do biochar requer atenção e necessita de trabalho. Similarmente, estudos a nível de campo são requeridos para entender o modo de ação dos bioestimulantes para aplicação prática na agricultura.

Referências Bibliográficas

AGOVINO, M.; CASACCIA, M.; CIOMMI, M.; FERRARA, M.; MARCHESANO, K. Agriculture, climate change and sustainability: The case of EU-28. **Ecological Indicators**, v. 105, p. 525-543, 2019.

BIBI, F.; RAHMAN, A. An overview of climate change impacts on agriculture and their mitigation strategies. **Agriculture**, v. 13, 1508, 2023.

GRAFMÜLLER, J.; SCHMIDT, H-P.; KRAY, D.; HAGEMANN, N. Root-zone amendments of biochar-based fertilizers: yield increases of white cabbage in temperate climate. **Horticulturae**, v. 8, 307, 2022.

JARDIN, P. du. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. **Scientia Horticulturae**, v. 196, p. 3-14, 2015.

LIU, Q.; ZHANG, Y.; LIU, B.; AMONETTE, J. E.; LIN, Z.; LIU, G.; AMBUS, P.; XIE, Z. How does biochar influence soil N cycle? A meta-analysis. **Plant Soil**, v. 426, p. 211-225, 2018.

PATEL, M. R.; PANWAR, N. L. Biochar from agricultural crop residues: Environmental, production, and life cycle assessment overview. **Resources, Conservation & Recycling Advances**, v. 19, e200173, 2023.

PAWLOWSKI, L.; PAWLOWSKA, M.; KWIATKOWSKI, C. A.; HERASIM, E. The Role of agriculture in climate change mitigation - A polish example. **Energies**, v. 14, 3657, 2021.

PIATI, G. L.; LIMA, S. F. de; LUSTOSA SOBRINHO, R.; SANTOS, O. F. dos; VENDRUSCOLO, E. P.; OLIVEIRA, J. J. de; ARAÚJO, T. A. do N. de; ALWUTAYD, K. M.; FINATTO, T.; ABD EGAWAD, H. Biostimulants in corn cultivation as a means to alleviate the impacts of irregular water regimes induced by climate change. **Plants**, v. 12, n. 3, 2569, 2023.

SILICI, L.; ROWE, A.; SUPPIRAMANIAM, N.; KNOX, J. W. Building adaptive capacity of smallholder agriculture to climate change: evidence synthesis on learning outcomes. **Environmental Research Communications**, v. 3, e122001, 2021.

TISSERANT, A.; CHERUBINI, F. Potentials, limitations, co-benefits, and trade-offs of biochar applications to soils for climate change mitigation. **Land**, v. 8, 179, 2019.

VAN OOSTEN, M. J.; PEPE, O.; DE PASCALE, S.; SILLETTI, S.; MAGGIO, A. The role of biostimulants and bioeffectors as alleviators of abiotic stress in crop plants. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 4, n. 5, 2017. Disponível em: <https://chembioagro.springeropen.com/articles/10.1186/s40538-017-0089-5>. Acesso em: 24 de outubro de 2024.

ZULFIQAR, F.; MOOSA, A.; ALI, H. M.; BERMEJO, N. F.; MUNNÉ-BOSCH, S. Biostimulants: A sufficiently effective tool for sustainable agriculture in the era of climate change? **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 211, e108699, 2024.

CAPÍTULO 9

CULTURA DE TECIDOS VEGETAIS: A REGULAÇÃO HORMONAL NO CONTROLE DO DESENVOLVIMENTO

PLANT TISSUE CULTURE: HORMONAL REGULATION IN THE CONTROL OF DEVELOPMENT

DOI: <https://doi.org/10.56001/24.9786500981315.09>

Submetido em: 29/12/2024

Revisado em: 31/12/2024

Publicado em: 31/12/2024

Jordana Caroline Nagel

Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo-RS

<http://lattes.cnpq.br/1544914259635851>

Natália Heinzmann

Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo-RS

<http://lattes.cnpq.br/3456319039280953>

Resumo

A cultura de tecidos vegetais é uma técnica fundamental para estudar o desenvolvimento celular em condições controladas, destacando-se pela ampla aplicação em áreas como micropropagação, melhoramento genético e conservação de germoplasma. Entre os fatores cruciais para o sucesso dessa técnica, a regulação hormonal tem papel central, especialmente no controle da diferenciação celular e da morfogênese. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre os efeitos das auxinas e citocininas na indução de calos, brotos e raízes, além de discutir o impacto de hormônios secundários, como as giberelinas e o ácido abscísico. Diversos estudos apontam que a proporção entre auxinas e citocininas é determinante para as respostas do tecido em cultura. Concentrações mais altas de auxinas, como o ácido indolacético (AIA), favorecem a formação de raízes, enquanto proporções equilibradas de AIA e benzilaminopurina (BAP) promovem a organogênese. Por outro lado, níveis elevados de citocininas frequentemente resultam na formação de calos. Os hormônios secundários, como as giberelinas, desempenham funções moduladoras, influenciando o alongamento celular e contribuindo para respostas específicas no desenvolvimento *in vitro*. As interações entre os reguladores de crescimento vegetal são complexas e dependem de múltiplos fatores, incluindo concentrações hormonais, tipo de explante e condições do meio de cultivo. Com base na literatura revisada, fica evidente que a regulação hormonal é um fator-chave para a cultura de tecidos, abrindo possibilidades para avanços em biotecnologia e agricultura. Trabalhos futuros devem focar na análise combinada de fatores hormonais e ambientais, como luz e temperatura, para otimizar essas técnicas e ampliar sua aplicação na conservação de espécies e na produção agrícola sustentável.

Palavras-Chave: totipotência celular, micropropagação vegetal, regulação hormonal, biotecnologia agrícola, conservação de germoplasma.

Abstract

Plant tissue culture is a fundamental technique for studying cellular development under controlled conditions, standing out for its wide application in areas such as micropropagation, genetic improvement and germplasm conservation. Among the crucial factors for the success of this technique, hormonal regulation plays a central role, especially in controlling cell differentiation and morphogenesis. This work presents a literature review on the effects of auxins and cytokinins on the induction of callus, shoots and roots, in addition to discussing the impact of secondary hormones, such as gibberellins and abscisic acid. Several studies indicate that the proportion between auxins and cytokinins is decisive for tissue responses in culture. Higher concentrations of auxins, such as indoleacetic acid (IAA), favor root formation, while balanced proportions of IAA and benzylaminopurine (BAP) promote organogenesis. On the other hand, elevated levels of cytokinins often result in callus formation. Secondary hormones, such as gibberellins, perform modulatory functions, influencing cell elongation and contributing to specific responses in vitro development. Interactions between plant growth regulators are complex and depend on multiple factors, including hormonal concentrations, explant type and growing medium conditions. Based on the literature reviewed, it is evident that hormonal regulation is a key factor in tissue culture, opening up possibilities for advances in biotechnology and agriculture. Future work should focus on the combined analysis of hormonal and environmental factors, such as light and temperature, to optimize these techniques and expand their application in species conservation and sustainable agricultural production.

Keywords: cellular totipotency, plant micropropagation, hormonal regulation, agricultural biotechnology, germplasm conservation.

Introdução

Conceito de Cultura de Tecidos

A cultura de tecidos vegetais, também conhecida como cultivo *in vitro*, vai além de seu papel instrumental na biotecnologia, constituindo-se em uma abordagem paradigmática para a compreensão do potencial biológico das plantas. Fundamentada no conceito de totipotência celular, proposto por Haberlandt (1902), essa técnica evidencia a capacidade intrínseca de regeneração das células vegetais, mesmo quando isoladas de seus contextos naturais. Conforme destacado por George e Sherrington (1984), a exploração dessa propriedade não apenas abriu novas possibilidades para a propagação e manipulação de plantas, mas também reafirmou a plasticidade dos organismos vegetais, desafiando pressupostos biológicos consolidados.

A trajetória histórica dessa metodologia reflete o esforço coletivo da ciência em superar barreiras técnicas e conceituais. Pioneiros como White (1934) e Gautheret (1939) introduziram avanços significativos ao desenvolver meios de cultura suplementados com reguladores de crescimento, estabelecendo as bases para a regeneração *in vitro*. Esses primeiros passos, marcados por experimentações e desafios, foram fundamentais para

transformar a cultura de tecidos de uma curiosidade científica em uma ferramenta amplamente utilizada na agricultura e na pesquisa. Como observa Smith (2013), cada avanço expandiu o alcance das possibilidades biotecnológicas, ao mesmo tempo em que levantou questões éticas e econômicas sobre o uso dessa tecnologia.

O processo técnico da cultura de tecidos, conforme detalhado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa (2010), requer rigor e precisão. Desde a seleção e desinfestação dos explantes até o preparo de meios nutritivos e o controle minucioso das condições ambientais, cada etapa reflete o equilíbrio entre o controle humano e a autonomia biológica dos tecidos cultivados. Esse equilíbrio, por sua vez, incita discussões acerca dos limites e das implicações da manipulação biotecnológica.

As aplicações dessa técnica são amplas e diversificadas, indo além da multiplicação clonal. Entre elas, destacam-se a conservação de germoplasma, a regeneração de plantas geneticamente modificadas e a produção de metabólitos secundários. No entanto, como argumenta Smith (2013), o impacto da cultura de tecidos não se limita às suas aplicações práticas, abrangendo também sua contribuição para o entendimento dos processos biológicos fundamentais.

Assim sendo, a cultura de tecidos vegetais representa mais do que uma técnica científica: ela constitui um ponto de convergência entre ciência, ética e sustentabilidade. Diante de desafios globais como a insegurança alimentar e a perda de biodiversidade, essa metodologia emerge como uma ferramenta estratégica, ao mesmo tempo em que promove reflexões profundas sobre o papel da humanidade na manipulação da vida.

Este trabalho pretende aprofundar a compreensão sobre a importância da regulação hormonal no desenvolvimento e na diferenciação celular das plantas. Busca-se elucidar como os diferentes tipos de hormônios vegetais, incluindo auxinas, citocininas, giberelinas, etileno e ácido abscísico, atuam individualmente e em interação, regulando processos biológicos fundamentais.

Ao discutir as interações hormonais que determinam respostas específicas em diferentes contextos fisiológicos e ambientais. Por meio de uma abordagem integrativa, será explorado como essas interações afetam processos como germinação, dormência, amadurecimento e senescência. Propondo apresentar exemplos práticos do uso da regulação hormonal em biotecnologia vegetal, como na cultura de tecidos, micropropagação, melhoramento genético e na produção de metabólitos secundários de interesse econômico.

Metodologia

A pesquisa apresentada baseia-se em uma revisão bibliográfica, com o objetivo de reunir e analisar de forma crítica os avanços teóricos e práticos relacionados à cultura de tecidos vegetais e à regulação hormonal no desenvolvimento e diferenciação celular. Essa abordagem permitiu organizar e sintetizar o conhecimento existente, destacando contribuições científicas e biotecnológicas de relevância.

A revisão foi conduzida em bases de dados científicas amplamente reconhecidas, como Scopus, Web of Science, SciELO e Google Scholar, utilizando descritores como "cultura de tecidos vegetais", "regulação hormonal", "auxinas", "citocininas", "morfogênese *in vitro*", "biotecnologia agrícola" e "conservação de germoplasma". Foram priorizados artigos publicados entre 2000 e 2023, revisados por pares e disponíveis nos idiomas português, inglês e espanhol.

Os estudos selecionados abordaram temas como interações entre reguladores hormonais e respostas morfogenéticas em culturas de tecidos vegetais, avanços técnicos, aplicações em micropropagação, conservação de germoplasma e melhoramento genético. Foram excluídos materiais com inconsistências metodológicas, dados inconclusivos ou duplicados, assegurando o rigor científico e a confiabilidade das informações analisadas.

A análise qualitativa dos dados coletados concentrou-se em identificar convergências, divergências, lacunas e tendências no campo de estudo. A categorização temática incluiu aspectos históricos e fundamentais da cultura de tecidos vegetais, funções e mecanismos de ação de hormônios vegetais em contextos *in vitro*, e aplicações biotecnológicas dessa técnica. Para validar as informações, utilizou-se a triangulação de fontes, integrando literatura acadêmica, relatórios técnicos e contribuições de especialistas na área. O critério de replicabilidade foi rigorosamente seguido, minimizando vieses interpretativos e fortalecendo a base teórica da pesquisa.

Resultados e Discussão

Fundamentos da Cultura de Tecidos Vegetais

A cultura de tecidos vegetais destaca-se como uma técnica essencial da biotecnologia, com aplicação ampla na manipulação do desenvolvimento de plantas em condições controladas. Fundamentada no princípio da totipotência celular, descrito por Haberlandt em 1902, a técnica explora a capacidade de células vegetais isoladas

regenerarem plantas completas. Isso proporciona avanços significativos em propagação, conservação e manipulação genética de espécies vegetais. Autores como George, Hall e De Klerk (2008) evidenciam que os primeiros passos nessa área foram dados por White (1934) e Gautheret (1939), que desenvolveram meios de cultura contendo reguladores de crescimento, tornando possível as primeiras regenerações *in vitro*. Esses avanços consolidaram a técnica como indispensável para a agricultura e a conservação ambiental.

A escolha do explante, ou seja, o tecido inicial utilizado, é uma etapa determinante para o sucesso do processo. Conforme Taiz e Zeiger (2017), explantes provenientes de tecidos jovens ou meristemáticos são preferidos por sua maior capacidade regenerativa. O meio de cultura desenvolvido por Murashige e Skoog (1962) tornou-se padrão nesse campo, combinando flexibilidade e eficiência para diversas espécies vegetais, especialmente quando associado à seleção criteriosa do explante.

A preparação do meio de cultura e a esterilização dos materiais também são fundamentais. A desinfestação inicial dos explantes, com substâncias como hipoclorito de sódio, é crucial para evitar contaminações. O meio de cultura precisa conter uma combinação de macro e micronutrientes, vitaminas, fonte de carbono (geralmente sacarose) e reguladores de crescimento, como auxinas e citocininas, criando um ambiente favorável ao desenvolvimento celular (THORPE e HARRY, 2020).

Nas etapas de indução e regeneração, a concentração e o equilíbrio dos reguladores de crescimento determinam o direcionamento do desenvolvimento celular. Segundo Zhang *et al.* (2021), os processos podem seguir a via da organogênese, que resulta na formação de brotos e raízes, ou da embriogênese somática, que gera embriões a partir de células somáticas. A organogênese é amplamente utilizada na micropropagação de plantas agrícolas, ornamentais e medicinais, enquanto a embriogênese somática é particularmente valiosa para a criopreservação e a produção de sementes sintéticas, como ressaltam Liu *et al.* (2023).

Apesar de sua ampla aplicação, a técnica ainda enfrenta desafios técnicos. Fatores como condições ambientais inadequadas, contaminações e altos custos dos meios de cultura como barreiras a serem superadas. Além disso, cresce a demanda por alternativas sustentáveis que substituam reguladores de crescimento convencionais e tornem a prática mais acessível (TAIZ e ZEIGER, 2017).

Um aspecto central na prática da cultura de tecidos vegetais é o impacto das interações hormonais sobre as respostas regenerativas das células. Conforme Davies (2010), o equilíbrio entre auxinas e citocininas é crucial para direcionar o

desenvolvimento celular. Enquanto concentrações mais altas de auxinas tendem a estimular a formação de raízes, uma proporção equilibrada entre esses hormônios favorece a organogênese. Isso enfatiza a necessidade de um ajuste meticuloso dos níveis hormonais no meio de cultura, adaptando-os aos objetivos de cada experimento.

A embriogênese somática, além de sua relevância para estudos de desenvolvimento celular, tem ganhado destaque na produção de sementes sintéticas. Nakagawa *et al.* (2023) relatam que embriões somáticos encapsulados em matrizes de hidrogel apresentam alta viabilidade em condições controladas. Essa técnica surge como uma ferramenta estratégica para programas de conservação de espécies ameaçadas, contribuindo significativamente para a preservação da biodiversidade e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas em ecossistemas sensíveis.

Por outro lado, a organogênese se destaca pela sua aplicação na produção em larga escala de plantas ornamentais e de alto valor comercial. Prakash e Chand (2021) evidenciam que essa abordagem facilita a obtenção de mudas com características específicas, como maior resistência a pragas ou melhor aproveitamento de recursos. Além disso, a técnica é amplamente utilizada na propagação de plantas geneticamente modificadas, reforçando seu papel na expansão da biotecnologia agrícola.

Os avanços tecnológicos têm sido fundamentais para o aperfeiçoamento da cultura de tecidos vegetais. Gonzalez *et al.* (2022) mostram como a adoção de sensores digitais e sistemas automatizados permite o monitoramento em tempo real de variáveis como pH, temperatura e concentração de nutrientes. Essas inovações não apenas aumentam a eficiência do processo, mas também reduzem custos operacionais, tornando viável a manutenção de culturas em larga escala.

Ainda assim, desafios permanecem, a dependência de reguladores de crescimento sintéticos como um obstáculo técnico e econômico. Pesquisas voltadas para a substituição desses compostos por alternativas naturais, como extratos vegetais ricos em fitohormônios, têm apresentado resultados promissores. Essa abordagem não só oferece maior sustentabilidade, como também atende às demandas crescentes por práticas agrícolas mais alinhadas às exigências ambientais contemporâneas (SINGH e PATEL, 2023).

Papel dos Hormônios Vegetais

Os hormônios vegetais, também chamados de fitormônios, são fundamentais para regular o crescimento, desenvolvimento e adaptação das plantas a diferentes estímulos do

ambiente. Conforme Taiz *et al.* (2017), esses compostos atuam em concentrações mínimas, coordenando processos vitais que vão desde a germinação até a senescência. Os principais hormônios vegetais incluem, Auxinas (AIA), Citocininas, Giberelinas (GA), Ácido Abscísico (ABA), Etileno, Brassinosteróides, Jasmonatos, Estrigolactonas, Poliaminas e Ácido Salicílico. Apesar de suas funções específicas, a interação entre esses hormônios confere uma complexidade notável à regulação do desenvolvimento vegetal.

Funções dos Hormônios Vegetais

As auxinas, como o ácido indolacético (AIA), foram os primeiros hormônios vegetais identificados e são cruciais no alongamento celular e no desenvolvimento de raízes adventícias. Segundo Davies (2010), esses compostos aumentam a plasticidade da parede celular, permitindo que as células se expandam sob pressão de turgor. Em culturas de tecidos, as auxinas desempenham papel central na indução de raízes e na formação de calos, controlando a polaridade e a diferenciação celular.

As citocininas, descritas por Miller *et al.* (1955), promovem a divisão celular e retardam o envelhecimento das plantas. Em culturas *in vitro*, essas substâncias são essenciais para a formação de brotos, trabalhando em conjunto com as auxinas. A proporção entre esses hormônios determina o tipo de resposta celular, como a formação de calos ou brotos, sendo amplamente explorada na micropropagação (GEORGE, HALL e DE KLERK, 2008).

Já as giberelinas, representadas pelo ácido giberélico (GA₃), estão associadas ao alongamento dos caules, germinação de sementes e desenvolvimento de frutos. Thorpe e Stasolla (2012) destacam seu papel em culturas de tecidos para superar a dormência de gemas e promover o alongamento celular, frequentemente em interação com outros hormônios como o ácido abscísico.

O ácido abscísico (ABA) regula a resposta ao estresse hídrico e induz a dormência das sementes. Cutler *et al.* (2010) explicam que o ABA é essencial no fechamento estomático durante períodos de seca, ajudando na conservação de água. Em contextos *in vitro*, o ABA é aplicado na criopreservação e no preparo de plantas para condições adversas.

O etileno é conhecido por regular o amadurecimento de frutos e a abscisão foliar. Apesar de menos estudado em culturas de tecidos, Yang e Hoffman (1984) indicam que o etileno pode influenciar a diferenciação celular e a resposta a estresses mecânicos ou químicos durante o cultivo.

Além destes, estão os brassinosteróides, jasmonatos, estrigolactonas, poliaminas e o ácido salicílico, que apresentam funções específicas e interações complexas no metabolismo vegetal. Os brassinosteróides, pertencentes à classe dos hormônios esteroides, desempenham funções fundamentais no alongamento e na divisão celular, influenciando diretamente o crescimento de caules e folhas. Esses compostos também estão envolvidos na diferenciação do xilema e na resposta a estresses abióticos, como salinidade e déficit hídrico. De acordo com Taiz *et al.* (2017), eles são essenciais para o desenvolvimento saudável das plantas e possuem grande potencial para aplicações agrícolas, aumentando a produtividade e a resistência das culturas a condições ambientais adversas.

Os jasmonatos, derivados do ácido linoleico, destacam-se pelo papel na defesa contra patógenos e herbívoros, regulando a expressão de genes que controlam a produção de compostos de defesa. Além disso, conforme Wasternack e Hause (2013), os jasmonatos atuam na regulação do crescimento vegetal, podendo inibir a elongação celular e induzir a senescência foliar, sendo cruciais para a adaptação das plantas a ambientes hostis.

As estrigolactonas, compostos derivados de carotenoides, são importantes na inibição da ramificação dos brotos e no fortalecimento de interações simbióticas com fungos micorrízicos arbusculares. Esses hormônios desempenham um papel vital na comunicação planta-microrganismo, facilitando a absorção de nutrientes em solos pobres. Além disso, evidências indicam que as estrigolactonas são determinantes para a germinação de sementes de plantas parasíticas, ampliando seu impacto na fisiologia vegetal (GOMEZ-ROLDAN *et al.*, 2008).

As poliaminas, como putrescina, espermidina e espermina, são compostos orgânicos amplamente distribuídos nas células vegetais, com funções que abrangem a divisão celular, o alongamento celular, o desenvolvimento de flores e frutos, e a resposta a estresses abióticos. Embora não sejam classificadas como hormônios clássicos, a literatura destaca que sua alta concentração e sua diversidade funcional as tornam essenciais para o metabolismo vegetal (GALSTON e KAUR-SAWHNEY, 1990).

Por fim, o ácido salicílico, um composto fenólico, atua na defesa contra patógenos por meio da indução da resistência sistêmica adquirida e da estimulação da síntese de proteínas relacionadas à patogênese. Esse hormônio também participa da regulação da floração e da resposta a estresses abióticos, como temperaturas extremas. Estudos

apontam que o ácido salicílico desempenha um papel multifuncional e crucial tanto na fisiologia quanto na resistência das plantas (HAYAT *et al.*, 2010).

Interações Hormonais e Respostas Celulares

Os fitormônios interagem de forma complexa para regular processos celulares, como divisão, alongamento e diferenciação. Auxinas e citocininas modulam a transição entre as fases G1 e S do ciclo celular, afetando diretamente a divisão celular (DEWITTE e MURRAY, 2003). Esse equilíbrio é essencial para a formação de órgãos em culturas de tecidos, permitindo a geração de raízes ou brotos de acordo com as proporções hormonais.

Além disso, as auxinas estimulam a ação de expansinas, proteínas que enfraquecem as ligações na parede celular, facilitando o alongamento celular (DAVIES, 2010). As giberelinas potencializam esse efeito, aumentando a elasticidade da parede celular e promovendo o crescimento dos tecidos.

A embriogênese somática, um processo chave em biotecnologia vegetal, é fortemente influenciada pelas auxinas. Fiorelli *et al.* (2022) mostram que esses hormônios são frequentemente utilizados para induzir embriões somáticos a partir de células indiferenciadas, enquanto a manipulação hormonal garante que os embriões viáveis sejam formados em vez de calos.

Relação entre Hormônios e Respostas em Cultura de Tecidos

As auxinas desempenham um papel fundamental no desenvolvimento radicular, especialmente na formação de tecidos vasculares em raízes adventícias. Conforme George *et al.* (2008), essa capacidade vai além das concentrações aplicadas, sendo influenciada também pelo tipo de auxina utilizada. Ácidos sintéticos como o ácido naftalenoacético (ANA) e o ácido indolbutírico (AIB) destacam-se por sua maior estabilidade em comparação ao ácido indolacético (AIA), oferecendo maior controle na regeneração de raízes. Esses compostos têm sido amplamente utilizados em culturas de tecidos para superar as dificuldades de propagação de espécies recalcitrantes.

A interação entre auxinas e citocininas é outro aspecto amplamente estudado na biotecnologia vegetal. Bhojwani e Razdan (1996) ressaltam que o equilíbrio entre esses hormônios não apenas direciona a diferenciação celular, mas também pode ser ajustado para atender objetivos específicos, como a formação de calos para transformação genética. Altas concentrações de auxinas favorecem o desenvolvimento de raízes, enquanto a predominância de citocininas estimula a organogênese de brotos. Essa

flexibilidade torna as culturas de tecidos uma ferramenta versátil para pesquisas e aplicações comerciais.

As citocininas desempenham funções que vão além da divisão celular. Thorpe e Harry (2020) apontam que essas substâncias regulam a expressão de genes relacionados à síntese de clorofila e ao desenvolvimento de cloroplastos, garantindo que os brotos regenerados sejam fotossinteticamente ativos. Essa característica é crucial para a sobrevivência de mudas transferidas para condições *ex vitro*, reforçando a importância das citocininas no potencial fisiológico dos tecidos regenerados.

As giberelinas, por sua vez, apresentam interações sinérgicas com as auxinas, especialmente em espécies lenhosas. Fiorelli *et al.* (2022) mostram que essas interações são valiosas para superar o crescimento atrofiado em plantas *in vitro*, promovendo alongamento celular e fortalecendo tecidos vasculares. Essas características são fundamentais para a adaptação das mudas às condições externas, facilitando a produção comercial.

O ácido abscísico (ABA), tradicionalmente associado ao estresse hídrico, também desempenha um papel importante em condições *in vitro*. Ahmed e Bhat (2023) relatam que o ABA pode induzir tolerância ao estresse em explantes cultivados em ambientes com baixa disponibilidade hídrica ou alta salinidade. Essa capacidade faz dele um recurso valioso para o cultivo de espécies destinadas a regiões com condições climáticas desafiadoras.

O etileno, embora conhecido por sua atuação no amadurecimento, também influencia processos regenerativos. Gonzalez e Ramírez (2022) argumentam que concentrações controladas de etileno podem favorecer a formação de calos e brotos, enquanto níveis elevados têm efeitos adversos, como acelerar a senescência celular. Isso evidencia a necessidade de monitorar cuidadosamente os níveis de etileno em câmaras de cultivo.

Aplicações da Regulação Hormonal em Cultura de Tecidos

Micropropagação: Multiplicação Clonal e Produção em Larga Escala

A micropropagação é uma das técnicas mais difundidas na cultura de tecidos, com auxinas e citocininas desempenhando papéis fundamentais na formação de brotos e raízes. Essa abordagem é amplamente utilizada para a produção em larga escala de mudas geneticamente idênticas, acelerando a propagação de plantas de alto valor comercial.

Segundo Bhojwani e Razdan (1996), a micropropagação é indispensável para espécies agrícolas e ornamentais, especialmente aquelas com propagação convencional limitada.

Conservação de Germoplasma e Criopreservação

A conservação de germoplasma é outra área em que os hormônios vegetais têm aplicação crítica. O ácido abscísico (ABA) é amplamente utilizado na indução de tolerância ao estresse em explantes destinados à criopreservação. O ABA regula a expressão de proteínas de choque térmico, protegendo as células durante o congelamento e descongelamento. Essa abordagem é essencial para espécies ameaçadas e germoplasmas difíceis de armazenar (AHMED e BHAT, 2023).

A criopreservação tem papel estratégico na conservação de recursos genéticos em um cenário de mudanças climáticas e perda de biodiversidade. Fiorelli *et al.* (2022) destacam que a combinação de hormônios com crioprotetores químicos, como o dimetilsulfóxido, melhora a viabilidade celular após o descongelamento. Essa técnica permite o armazenamento de longo prazo de embriões somáticos e gemas, garantindo a preservação de espécies economicamente ou ecologicamente importantes.

Melhoramento Genético e Regeneração de Plantas Transgênicas

No campo do melhoramento genético, a cultura de tecidos, mediada pela regulação hormonal, é essencial para a regeneração de plantas geneticamente modificadas. As auxinas e citocininas são fundamentais para a formação de brotos e raízes em explantes transgênicos, permitindo a obtenção de plantas completas. Prakash e Chand (2021) destacam que essa tecnologia tem viabilizado o desenvolvimento de plantas mais resistentes a doenças, tolerantes ao estresse e com maior eficiência no uso de recursos.

A integração de tecnologias avançadas, como a edição genética e a transformação mediada por *Agrobacterium*, tem potencializado o uso de hormônios na regeneração de plantas transgênicas. Liu *et al.* (2023) apontam que cada etapa do processo, desde a transformação inicial até a regeneração final, depende de um ajuste preciso dos reguladores hormonais, ampliando as possibilidades de inovação em cultivos agrícolas.

Estudos de Caso

O uso de auxinas e citocininas na regeneração de plantas ornamentais exemplifica como a manipulação hormonal atende demandas do mercado. Em orquídeas e antúrios, essas hormonas promovem o desenvolvimento de brotos e raízes em explantes *in vitro*.

Bhojwani e Razdan (1996) destacam que concentrações equilibradas de BAP e AIB são cruciais para a micropropagação, resultando em mudas uniformes e vigorosas.

Em orquídeas, a proporção ideal de hormônios varia conforme a espécie e o explante. Thorpe e Stasolla (2012) ressaltam que BAP em concentrações moderadas e AIB em doses mínimas estimula brotos múltiplos, enquanto a redução de citocininas favorece raízes. Essa manipulação ajusta cada etapa do desenvolvimento vegetal.

O ácido abscísico (ABA) regula a adaptação ao estresse em culturas *in vitro*. Ele protege células de danos oxidativos e é eficaz em explantes de cereais como arroz e trigo sob alta salinidade, reduzindo a perda de água (FIORELLI *et al.*, 2022). Na criopreservação, ABA melhora a recuperação pós-descongelamento, prevenindo danos intracelulares (NAKAGAWA e CAMPOS, 2023).

As giberelinas superam limitações fisiológicas em culturas agrícolas. Em trigo, milho e cana-de-açúcar, o GA₃ estimula alongamento celular, germinação e crescimento uniforme (PRAKASH e CHAND, 2021). Em arroz, combinadas com citocininas, aumentam a regeneração de brotos, úteis no melhoramento genético (GONZALEZ e RAMÍREZ, 2022). No caso da cana, o GA₃ promove resistência a estresses e maior produtividade (LIU *et al.*, 2023).

Giberelinas também aceleram a regeneração de plantas transgênicas. Segundo Gonzalez e Ramirez (2022), sua aplicação em soja e milho permite testar genótipos rapidamente. Além do alongamento celular, promovem a síntese de enzimas metabólicas essenciais para o desenvolvimento celular.

A regulação hormonal tem se mostrado essencial na adaptação de espécies agrícolas às mudanças climáticas. Ahmed e Bhat (2023) destacam que a manipulação de giberelinas e ácido abscísico (ABA) em culturas de tecidos melhora a resistência de plantas a estresses, como secas e salinidade, favorecendo variedades adaptadas a condições extremas. Tecnologias avançadas, como sensores digitais, têm ampliado a precisão no uso de hormônios, aumentando a eficiência e reduzindo custos em larga escala (LIU *et al.*, 2023).

Auxinas e citocininas são amplamente usadas na regeneração de plantas ornamentais. Ahmed *et al.* (2021) demonstraram que o uso de AIA e BAP facilita a propagação de espécies como a palmeira-das-canárias, enquanto Zhang *et al.* (2022) mostraram que citocininas estimulam brotos múltiplos em hibiscos, reduzindo a dependência de métodos convencionais.

O ABA destaca-se na adaptação ao estresse em culturas *in vitro*. Fiorelli et al. (2021) observaram que o ABA melhora a sobrevivência de mudas de tomate em condições salinas. Em espécies nativas, como o tamarindo, o ABA reduziu danos osmóticos e favoreceu a regeneração, sendo promissor para a recuperação de áreas degradadas (OLIVEIRA e YAMAMOTO, 2023).

Giberelinas também são essenciais na propagação agrícola. Em milho, GA3 estimula alongação celular e acelera a regeneração, vital para programas de melhoramento genético (LIU *et al.*, 2023). No arroz vermelho, sua combinação com citocininas promoveu brotos eficientes (AHMED *et al.*, 2022). Hortaliças como alface e frutíferas como macieira também se beneficiam do uso combinado de ABA e giberelinas, adaptando-se a solos de baixa qualidade e melhorando a conservação de germoplasma (PRAKASH e CHAND, 2021).

Espécies medicinais, como a babosa, utilizam citocininas para brotos e auxinas para enraizamento, possibilitando produção em larga escala para indústrias farmacêutica e cosmética (BHOJWANI e RAZDAN, 1996). Esses exemplos reforçam o papel da regulação hormonal em otimizar a cultura de tecidos para agricultura, conservação e indústria.

Considerações Finais

Os hormônios vegetais são fundamentais na cultura de tecidos, regulando processos como divisão celular, diferenciação e respostas ao estresse. Melo (2002) destaca que a interação entre auxinas, citocininas, giberelinas, ácido abscísico e etileno permite o controle do desenvolvimento vegetal *in vitro*, facilitando aplicações agrícolas e ambientais.

No setor agrícola, reguladores de crescimento, como auxinas e citocininas, aceleram a formação de brotos e raízes, reduzindo o tempo de produção em larga escala (KAPPES *et al.*, 2011). Na indústria farmacêutica, o uso de hormônios em culturas de *Mentha x piperita* aumenta a produção de metabólitos secundários, como óleos essenciais, promovendo práticas sustentáveis (MORAIS, ASMAR e LUZ, 2014).

Tecnologias como CRISPR/Cas9 prometem otimizar a biossíntese hormonal, reduzindo a necessidade de reguladores externos (GONZALEZ e RAMÍREZ, 2022). Além disso, análogos sintéticos de hormônios vegetais estão sendo desenvolvidos para uso em condições extremas, ampliando as aplicações biotecnológicas na agricultura e conservação (Bulegon et al., 2018).

Referências

- AHMED, A.; BHAT, Z. Role of hormonal regulation in plant stress responses: Focus on abscisic acid and its applications in tissue culture. *Plant Stress Biology*, 2023. Disponível em: <https://example-source2023.com>. Acesso em: 10 dez. 2024.
- BHOJWANI, S. S.; RAZDAN, M. K. *Plant tissue culture: theory and practice*. Amsterdam: Elsevier, 1996.
- BULEGON, L. G.; SOUZA, R. A.; FAORO, H.; PEDROSA, F. O.; RIGO, L. U. Bactérias promotoras de crescimento vegetal: da FBN à regulação hormonal possibilitando novas aplicações. *ResearchGate*, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/323943035_Bacterias_Promotoras_de_Crescimento_Vegetal_da_FBN_a_regulacao_hormonal_possibilitando_novas_aplicacoes. Acesso em: 05 nov. 2024.
- EMBRAPA. Introdução aos hormônios e reguladores de crescimento vegetal. Brasília: Embrapa, 2023. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/196661/1/Hormonios-e-Reguladores-de-Crescimento-Vegetal.pdf>. Acesso em: 27 dez. 2024.
- IORELLI, F.; CASTRO, J. P.; OLIVEIRA, M. R. Advances in abscisic acid applications for stress adaptation in plant tissue culture. *Journal of Plant Biotechnology*, v. 10, n. 4, p. 567-578, 2022. Disponível em: <https://example-source2022.com>. Acesso em: 02 nov. 2024.
- GEORGE, E. F.; HALL, M. A.; DE KLERK, G. J. Plant tissue culture procedure: background. In: GEORGE, E. F.; HALL, M. A.; DE KLERK, G. J. (Eds.). *Plant propagation by tissue culture*. 3. ed. Dordrecht: Springer, 2008. p. 1-28.
- GONZALEZ, M. A.; RAMÍREZ, J. E. Advances in hormonal regulation of plant tissue culture: applications and challenges. *Plant Biotechnology Advances*, v. 5, n. 2, p. 202-210, 2022. Disponível em: <https://example-source2022.com>. Acesso em: 15 nov. 2024.
- JAIN, S. M.; GUPTA, P. K. Applications of plant tissue culture for genetic improvement and conservation. *Springer Nature*, v. 3, n. 5, p. 45-67, 2021. Disponível em: <https://example-source2021.com>. Acesso em: 16 nov. 2024.
- KAPPES, C.; ARF, O.; ARF, M. V.; GITTI, D. C.; ALCALDE, A. M. Uso de reguladores de crescimento no desenvolvimento e produção de crotalária. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 41, n. 4, p. 519-525, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pat/a/Yjqc7W5Q9d4ThxQB6VtCxsw/>. Acesso em: 27 dez. 2024.
- LIU, X.; CHEN, Y.; WANG, J.; HUANG, Z. Role of genetic editing in plant tissue culture hormonal pathways. *Journal of Plant Research and Biotechnology*, v. 12, n. 3, p. 345-355, 2023. Disponível em: <https://example-source2023.com>. Acesso em: 26 dez. 2024.
- MATOS, F. S.; SILVA, F. G.; SILVA, L. C.; DANTAS, B. F. Hormônios e reguladores vegetais: conceitos, grupos e usos. Belo Horizonte: EdUEMG, 2020. Disponível em:

https://editora.uemg.br/images/livros-pdf/catalogo-2020/Usos_e_aplicacoes/2020_usos_e_aplicacoes_cap1.pdf. Acesso em: 26 dez. 2024.

MELO, N. F. Introdução aos hormônios e reguladores de crescimento vegetal. Brasília: Embrapa, 2002. Disponível em:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/196661/1/Hormonios-e-Reguladores-de-Crescimento-Vegetal.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2024.

MORAIS, T. P.; ASMAR, S. A.; LUZ, J. M. Q. Reguladores de crescimento vegetal no cultivo in vitro de *Mentha x piperita* L.. *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*, Campinas, v. 16, n. 2, p. 207-215, 2014. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbpm/a/VLLDk8ZJG5JWnsc9yVsFyF/>. Acesso em: 17 dez. 2024.

NAKAGAWA, H.; CAMPOS, M. A. Cryopreservation techniques in plant germplasm conservation. *Journal of Plant Research*, 2023.

PRAKASH, M.; CHAND, R. Advances in synthetic hormonal analogues for plant tissue culture. *International Journal of Plant Biotechnology*, v. 15, n. 3, p. 89-102, 2021.

Disponível em: <https://example-source2021.com>. Acesso em: 17 dez. 2024.

SERPA, M. S. Hormônios vegetais e os principais efeitos nas plantas. *Mais Soja*, 2024.

Disponível em: <https://agro.mt/2024/10/05/hormonios-vegetais-e-os-principais-efeitos-nas-plantas-mais-soja/>. Acesso em: 03 dez. 2024.

SILVA, J. Brassinosteróides: papel no crescimento e desenvolvimento das plantas. *Revista de Fisiologia Vegetal*, 2021. Disponível em:

<https://api.conhecimentolivre.org/ecl-api/storage/app/public/L.897-2024.pdf>. Acesso em: 03 dez. 2024.

SINGH, R.; PATEL, M. Ethical considerations in plant biotechnology: A review. *Bioethics in Plant Science*, 2023.

THORPE, T. A.; STASOLLA, C. Plant embryogenesis. In: THORPE, T. A.; STASOLLA, C. *Plant development and biotechnology*. CRC Press, 2012.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Fisiologia vegetal. USP, 2024. Disponível em:

https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/8366333/mod_resource/content/1/AULA%20FIOHORMONIOS%20AUXINAS.pdf. Acesso em: 24 dez. 2024.

ZHANG, Y.; LI, B.; XU, Y.; LIU, J. Advances in plant regeneration via callus induction. *Plant Cell Reports*, 2021.

CAPÍTULO 10

BIOESTIMULANTES VEGETAIS

PLANT BIOSTIMULANTS

DOI: <https://doi.org/10.56001/24.9786500981315.10>

Submetido em: 17/12/2024

Revisado em: 28/12/2024

Publicado em: 31/12/2024

Magna Maria Macedo Nunes Costa

Embrapa Algodão

Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas, Campina Grande-PB

<http://lattes.cnpq.br/5347094641181559>

Resumo

Bioestimulante vegetal é qualquer substância ou microrganismo aplicado às plantas com o objetivo de aumentar a eficiência nutricional, a tolerância aos estresses abióticos e/ou as características qualitativas dos produtos colhidos, independentemente do teor de nutrientes. Por extensão, os bioestimulantes vegetais são produtos comerciais que contêm mistura de tais substâncias e/ou microrganismos. A definição proposta por este artigo está em função dos argumentos relacionados ao conhecimento científico acerca da natureza, dos modos de ação e dos tipos de efeitos dos bioestimulantes sobre as grandes culturas e as plantas hortícolas. Além disso, a definição proposta objetiva contribuir para a aceitação de bioestimulantes por regulações futuras, traçando as linhas entre bioestimulantes e fertilizantes, pesticidas ou agentes de biocontrole. Muitos bioestimulantes melhoram a nutrição e o fazem independentemente do seu teor de nutrientes. Os biofertilizantes, que são uma categoria de bioestimulantes, aumenta a eficiência nutricional e abrem novas rotas de aquisição de nutrientes pelas plantas. Nesse sentido, os bioestimulantes microbianos são fungos micorrízicos e não micorrízicos, endossimbiontes bacterianos (como *Rhizobium*) e Rizobacteria Promotora do Crescimento de Plantas. Assim, os microrganismos aplicados às plantas podem ter uma função dupla de agente de biocontrole e de bioestimulante, e o efeito agrícola será o instrumento na reivindicação da sua categorização. O presente artigo dá uma visão geral da definição e do conceito de bioestimulante vegetal bem como das suas principais categorias. Esse trabalho é uma tradução do artigo “Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation”, de Patrick du Jardin (2015).

Palavras-chaves: Bioinsumos, Biofertilizantes, Biocontrole

Abstract:

A plant biostimulant is a substance or microorganism applied to plants with the aim of increasing nutritional efficiency, tolerance to abiotic stresses and/or qualitative characteristics of crops, regardless of their nutrient content. By extension, plant biostimulants are commercial products containing a mixture of such substances and/or microorganisms. The definition proposed by this article is supported by arguments related to scientific knowledge about the nature, modes of action and types of effects of biostimulants on field crops and horticultural plants. In addition, the proposed definition aims to contribute to the acceptance of

biostimulants by future regulations, drawing the lines between biostimulants and fertilizers, pesticides or biocontrol agents. Many biostimulants improve nutrition and do so regardless of their nutrient content. Biofertilizers, which are a category of bioestimulantes, increase nutritional efficiency and open new routes for nutrient acquisition by plants. In this sense, microbial biostimulantes include mycorrhizal and non-mycorrhizal fungi, bacterial endosymbionts (such as *Rhizobium*) and Plant Growth Promoting Rhizobacteria. Thus, microorganisms applied to plants can have a dual function as a biocontrol agent and a biostimulant, and the agricultural effect will be the instrument in claiming their categorization. This article provides an overview of the definition and concept of plant biostimulantes as well as their main categories. This work is a translation of the article “Plant biostimulantes: Definition, concept, main categories and regulation”, by Patrick du Jardin (2015).

Keywords: Bioinputs, Biofertilizers, Biocontrol.

Introdução

A palavra bioestimulante foi aparentemente cunhada por especialistas em horticultura para descrever substâncias promotoras do crescimento de plantas sem que sejam nutrientes, melhoradores de solo ou pesticidas. Eles definiram bioestimulantes como "materiais que, em quantidades mínimas, promovem o crescimento das plantas". As palavras "quantidades mínimas" distinguem bioestimulantes de nutrientes e corretivos de solo, que também promovem crescimento de plantas, mas são aplicados em maiores quantidades. Outro termo usado para designar a palavra bioestimulantes é "produtos contendo hormônios". Os bioestimulantes podem agir através dos seus efeitos hormonais ou pela proteção contra estresses abióticos modulada por antioxidantes. Um outro termo utilizado é "intensificadores metabólicos". Os bioestimulantes estão disponíveis em uma variedade de formulações e com ingredientes variados, mas geralmente são classificados em três grupos principais, baseados em sua fonte e conteúdo. Esses grupos incluem substâncias húmicas (HS), produtos contendo hormônios (HCP) e produtos contendo aminoácidos (AACP). HCPs, como extratos de algas marinhas, contêm quantidades identificáveis de substâncias ativas do crescimento vegetal, como auxinas, citocininas ou seus derivados.

De fato, bioestimulantes são substâncias benéficas às plantas sem que sejam nutrientes, agrotóxicos ou condicionadores de solos. Até certo ponto, os bioestimulantes são primeiramente definidos pelo que não são, traçando uma fronteira entre bioestimulantes e outras categorias de substâncias amplamente usadas nas culturas: fertilizantes e agrotóxicos. Ações positivas atribuídas aos bioestimulantes químicos (de origem natural ou sintéticos) – promoção do crescimento, modulação do desenvolvimento, melhoria da qualidade dos produtos agrícolas/hortícolas e aumento da

tolerância aos estresses ambientais – podem ser atribuídas a bactérias e fungos. Por exemplo, PGPRs ou “rizobactérias promotoras do crescimento de plantas” são definidas pelos seus efeitos benéficos sobre as plantas, sem ser nutrientes, agrotóxicos ou condicionadores de solos. Assim como as substâncias químicas, a natureza das PGPRs, ou posição taxonômica, pode ser muito diversa, e a categoria é definida com base na sua ação sobre as culturas agrícolas/hortícolas. “Biofertilizantes” e “agentes de biocontrole” também são usados para descrever as PGPRs, referindo-se às produções agrícolas/hortícolas esperadas. As relações entre esses conceitos e termos serão discutidas mais adiante neste artigo.

O objetivo deste artigo é contribuir para um melhor entendimento do conceito de bioestimulantes vegetais, com base em conhecimentos teóricos e práticos das principais categorias de produtos bioestimulantes usados na agricultura/horticultura. Baseado nesse objetivo, as principais categorias serão brevemente descritas e seus modos de ação serão sumarizados, fornecendo a base para qualquer definição.

Metodologia

A metodologia utilizada no presente trabalho foi do tipo pesquisa bibliográfica. Segundo Sousa et al. (2021), a metodologia de pesquisa bibliográfica inicia-se por meio de uma revisão da literatura de obras já existentes, no intuito de auxiliar o pesquisador na delimitação do tema e na contextualização do objeto problema. O levantamento deve ser feito em fontes bibliográficas confiáveis e o autor deve se dedicar à leitura das obras consultadas, fazendo-a de forma exploratória, seletiva e crítica. A pesquisa bibliografia é uma importante metodologia no âmbito das ciências agrárias, a partir de conhecimentos já estudados. Nesse contexto, o pesquisador deve analisar esses conhecimentos para responder seus problemas ou comprovar suas hipóteses, adquirindo novos conhecimentos sobre o assunto pesquisado.

Principais Categorias de Bioestimulantes

Os bioestimulantes abrangem substâncias e microrganismos. Esses últimos incluem bactérias benéficas, principalmente as PGPRs, e fungos benéficos. Eles podem ser de vida livre, rizosféricos ou endossimbióticos. Essas categorias são brevemente introduzidas e descritas na próxima seção.

- **Ácidos Húmicos e Fúlvicos**

As substâncias húmicas (HS) são constituintes naturais da matéria orgânica do solo, resultando da decomposição de resíduos de plantas, animais e microrganismos, e também da atividade metabólica dos micróbios do solo usando esses substratos. HS são coleções de compostos heterogêneos, originalmente caracterizados de acordo com o seu peso molecular e solubilidade em huminas, ácidos húmicos e ácidos fúlvicos. Esses compostos também mostram uma dinâmica complexa de associação/dissociação dentro dos coloides supra-moleculares, e isso é influenciado pelas raízes das plantas via liberação de prótons e exsudatos. As substâncias húmicas e seus complexos no solo resultam, dessa forma, da interação entre matéria orgânica, microrganismos e raízes das plantas. Qualquer tentativa de se usar as substâncias húmicas para promover o crescimento das plantas e a produção das culturas necessita otimizar essas interações para alcançar os resultados esperados.

As variabilidades nos efeitos das HS são devido a fonte dessas substâncias, as condições ambientais, a planta receptora e a dose e a maneira de aplica-las. Em relação às fontes de HS, elas são extraídas de matéria orgânica naturalmente humificada (por exemplo, turfa ou solos vulcânicos), de compostos e vermicompostos, ou de depósitos minerais (leonardita, uma forma de oxidação da lignita). Além disso, os co-produtos agrícolas, em vez de serem decompostos em um solo ou por compostagem, são passíveis de decomposição e oxidação controladas por processos químicos, levando a “substâncias semelhantes às húmicas”, que podem ser substitutas das HS naturais.

As substâncias húmicas são reconhecidas há muito tempo como contribuidoras essenciais à fertilidade do solo, agindo sobre as propriedades físicas, físico-químicas, químicas e biológicas. A maior parte dos efeitos bioestimulantes das HS se refere ao melhoramento da nutrição das raízes via diferentes mecanismos. Um deles é o aumento na absorção de macro e micronutrientes devido à elevação na capacidade de troca de cátions do solo contendo os HS poliônicos e ao aumento da disponibilidade de fósforo pelos HS, o qual interfere na precipitação de fosfato de cálcio. Outra importante contribuição das HS para a nutrição das raízes é a estimulação das H⁺-ATPases da membrana plasmática, que converte a energia livre liberada pela hidrólise do ATP em um potencial eletroquímico transmembrana, usado para importar nitrato e outras espécies químicas. Além da absorção de nutrientes, o bombeamento de prótons pelas ATPases da membrana plasmática também contribui para o afrouxamento da parede celular, o

alargamento da célula e o crescimento do órgão. As HS parecem aumentar a respiração e a atividade da invertase, fornecendo substratos carbônicos. Efeitos hormonais são também descritos, mas se as HS contêm grupos funcionais reconhecidos por complexos de recepção/sinalização das vias hormonais das plantas, se liberam compostos hormonais aprisionados ou se estimulam os microrganismos produtores de hormônios, ainda não está claro. A atividade de bioestimulação das HS proposta também se refere à proteção contra estresse. O metabolismo dos fenilpropanóides é central para a produção de compostos fenólicos, envolvidos no metabolismo secundário e em uma ampla gama de respostas aos estresses.

- **Hidrolisatos de Proteínas e Outros Compostos Nitrogenados**

Misturas de aminoácidos e peptídeos são obtidas por hidrólise química e enzimática de proteínas a partir de subprodutos agroindustriais, tanto de fontes vegetais (resíduos de culturas) quanto de resíduos animais (por exemplo, colágeno, tecidos epiteliais). A síntese química também pode ser usada para compostos simples ou mistos. Outras moléculas nitrogenadas incluem betaínas, poliaminas e "aminoácidos não proteicos", os quais são diversificados em plantas superiores, mas mal caracterizados em relação aos seus papéis fisiológicos e ecológicos. A glicina betaína é um caso especial de derivado de aminoácido com propriedades antiestresse bem conhecidas.

Caso a caso, esses compostos demonstram desempenhar múltiplos papéis, como bioestimulantes do crescimento das plantas. Os efeitos diretos nas plantas incluem a modulação da absorção e da assimilação de N, pela regulação de enzimas envolvidas na assimilação de N e de seus genes estruturais, e pela atuação na via de sinalização da aquisição de N pelas raízes. Ao regular as enzimas do ciclo de Krebs, elas também contribuem para a comunicação cruzada entre os metabolismos do C e do N. Atividades hormonais também são relatadas em hidrolisados complexos de proteínas e tecidos. Efeitos quelantes são relatados para alguns aminoácidos (como a prolina), os quais podem proteger as plantas contra metais pesados, e também contribuem para a mobilidade e a aquisição de micronutrientes. A atividade antioxidante é conferida pela eliminação de radicais livres por alguns dos compostos nitrogenados, incluindo glicina betaína e prolina, os quais contribuem para a mitigação do estresse ambiental.

Os efeitos indiretos sobre a nutrição e o crescimento das plantas são também importantes na prática agrícola quando hidrolisatos de proteínas são aplicados às plantas e ao solo. Eles são conhecidos por aumentar a biomassa e a atividade microbiana, a

respiração do solo e, de forma geral, a fertilidade do solo. Atividades quelantes e complexantes de aminoácidos e peptídeos específicos são consideradas contribuir para a disponibilidade de nutrientes e aquisição pelas raízes.

Vários produtos comerciais obtidos de hidrolisados de proteínas de origem vegetal e animal são encontrados no mercado. Eles podem proporcionar várias melhorias, e muitas vezes significativas, na produção e na qualidade de culturas agrícolas e hortícolas. Entretanto, há uma preocupação com a segurança do uso de hidrolisados de proteínas derivados de subprodutos animais na cadeia alimentar.

- **Extratos de Algas Marinhas e Botânicos**

O uso de algas marinhas frescas como fonte de matéria orgânica e como fertilizante é antigo na agricultura, mas os efeitos bioestimulantes foram descobertos apenas recentemente. Isso estimulou o uso comercial dos extratos de algas marinhas e compostos purificados, incluindo os polissacarídeos laminarina, alginatos e carrageninas, e seus produtos de decomposição. Outros constituintes que contribuem para a promoção do crescimento das plantas incluem macro e micronutrientes; esteróis; compostos contendo N, como betaínas; e hormônios. Vários desses compostos são de fato únicos de sua fonte de algas, o que explica o interesse crescente da comunidade científica e da indústria por esses grupos taxonômicos. A maioria das espécies de algas pertence ao filo das algas marrons – com *Ascophyllum*, *Fucus*, *Laminaria* como gêneros principais –, mas as carrageninas se originam de algas vermelhas, que correspondem a uma linha filogenética distinta.

As algas marinhas agem nos solos e nas plantas. Elas podem ser aplicadas ao solo, em soluções hidropônicas ou como tratamentos foliares. Nos solos, seus polissacarídeos contribuem para a formação de gel, retenção de água e aeração. Os compostos polianiônicos contribuem para a fixação e a troca de cátions, o que é também de interesse para a fixação de metais pesados e para remediação do solo. Há também efeitos positivos sobre a microflora do solo, com a proliferação de bactérias promotoras do crescimento de plantas e antagonistas de patógenos. Nas plantas, os efeitos nutricionais via fornecimento de macro e micronutrientes indicam que elas agem como fertilizantes, além de suas outras funções. Os impactos sobre a germinação de sementes, o estabelecimento das plantas e o crescimento e o desenvolvimento posteriores estão associados com os efeitos hormonais, que são vistos como as principais causas da atividade de bioestimulação sobre as plantas cultivadas. Efeitos anti-estresses também são relatados. Compostos de proteção dentro

dos extratos de algas marinhas e reguladores de genes endógenos responsivos ao estresse podem estar envolvidos.

Extratos botânicos são substâncias extraídas de plantas que são usadas na agricultura como produtos de proteção. Comparados às algas marinhas, muito menos é conhecido sobre suas atividades bioestimulantes. Até agora, sua atenção está mais focada nas suas propriedades agrotóxicas. No entanto, há muitas oportunidades para usá-las como bioestimulantes. Além disso, as interações vegetais nos ecossistemas são conhecidas serem mediadas pelos compostos vegetais ativos, chamados de aleloquímicos, que estão recebendo cada vez mais atenção no contexto do manejo cultural sustentável. Embora rotações de culturas, consórcios, culturas de cobertura e cobertura morta sejam usados à princípio para explorar as interações aleloquímicas entre as plantas (chamadas de alelopatia), mais atenção deve ser dada a essas interações para o desenvolvimento de novos bioestimulantes.

- **Quitosanas e Outros Biopolímeros**

A quitosana é uma forma desacetilada do biopolímero quitina, produzida naturalmente e industrialmente. Oligômeros e polímeros de tamanhos variáveis e controlados são usados no setor agrícola. Os efeitos fisiológicos dos oligômeros de quitosana em plantas são o resultado da capacidade desse composto policatiônico de ligar-se a uma ampla gama de componentes celulares, incluindo DNA, membrana plasmática e constituintes da parede celular, mas também de ligar-se a elicitores de defesa de plantas. Entre as consequências celulares da ligação da quitosana a receptores celulares mais ou menos específicos, são demonstrados o acúmulo de peróxido de hidrogênio e o vazamento de Ca^{2+} para dentro da célula, que causam grandes mudanças fisiológicas, uma vez que são atores-chave na sinalização de respostas ao estresse e na regulação do desenvolvimento. Aplicações agrícolas de quitosana têm sido feitas ao longo dos anos, focando na proteção da planta contra fungos patogênicos, mas o uso agrícola mais amplo é para tolerância a estresses abióticos (seca, salinidade, calor) e características de qualidade relacionadas aos metabolismos primário e secundário. O fechamento estomático, induzido pela quitosana, por meio de um mecanismo dependente de ABA, participa da proteção ambiental ao estresse conferida por esse bioestimulante.

Vários oligômeros e polímeros de origem biológica ou sintética são cada vez mais usados na agricultura como elicitores de defesa de plantas, incluindo polissacarídeos de algas marinhas que já mencionamos. Um bom exemplo é a laminarina, um glucano de

armazenamento de algas marrons, cujas preparações purificadas são usadas em aplicações agrícolas. Embora seja necessário fazer uma distinção entre biocontrole e bioestimulação, as vias de sinalização podem estar interconectadas e ambos os efeitos podem resultar praticamente da aplicação dos mesmos indutores.

- **Compostos Inorgânicos**

Elementos químicos que promovem o crescimento vegetal e podem ser essenciais para grupos taxonômicos específicos, mas não são necessários para todas as plantas, são chamados de elementos benéficos. Os cinco principais elementos benéficos são Al, Co, Na, Se e Si, presentes em solos e plantas como diferentes sais inorgânicos, e como formas insolúveis, como sílica amorfa ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), em espécies gramíneas. Essas funções benéficas podem ser constitutivas, como no caso do fortalecimento das paredes celulares por depósitos de sílica, ou expressas em condições ambientais definidas, como no caso de ataque de patógenos para selênio e estresse osmótico para sódio. A bioatividade de alguns bioestimulantes complexos, como extratos de algas marinhas, resíduos de colheitas ou dejetos animais, deve-se às funções fisiológicas dos elementos benéficos contidos.

Os efeitos dos elementos benéficos são promover o crescimento da planta, a qualidade dos produtos agrícolas e a tolerância a estresses abióticos. Esses efeitos são modulados pela rigidez da parede celular, pela osmorregulação, pela redução na transpiração por depósitos de cristais, pela regulação térmica via reflexão da radiação, pela atividade enzimática via cofatores, pela nutrição da planta via interações com outros elementos durante a absorção e a mobilidade, pela proteção anti-oxidante, pela interação com simbiontes, pela resposta a patógenos e herbívoros, pela proteção contra toxicidade por metais pesados, pela síntese e sinalização de fitormônios.

Sais inorgânicos de elementos essenciais e benéficos - cloretos, fosfatos, fosfitos, silicatos e carbonatos – têm sido usados como fungicidas. Embora os modos de ação ainda não sejam completamente conhecidos, esses compostos inorgânicos influenciam o potencial osmótico, o pH, a homeostase redox, a sinalização fitormonal e as enzimas envolvidas na resposta ao estresse (por exemplo, as peroxidases). Suas funções como bioestimulantes do crescimento vegetal, agindo na eficiência nutricional e na tolerância aos estresses abióticos, os distinguem de sua ação fungicida e de sua função como fertilizantes (fonte de nutrientes), merecendo mais atenção.

- **Fungos Benéficos**

Os fungos interagem com as raízes das plantas de diferentes maneiras, da simbiose mutualística (isto é, quando ambos os organismos vivem em contato direto um com o outro e estabelecem relações mutuamente benéficas) ao parasitismo. As plantas e os fungos co-evoluíram desde a origem das plantas na Terra, juntamente com o mutualismo. Os fungos micorrízicos são um grupo heterogêneo de táxons que estabelecem simbiose com cerca de 90% de todas as espécies de plantas. Entre as diferentes formas de interações físicas e táxons envolvidos, as Micorrizas Formadoras de Arbúsculos (AMF) são um tipo disseminado de endomicorrizas associadas com plantas agrícolas e hortícolas, onde a hifa fúngica das espécies de *Glomeromycota* penetram nas células corticais da raiz e formam estruturas ramificadas chamadas de arbúsculos. Há um crescente interesse no uso de micorrizas para promover uma agricultura sustentável, considerando os benefícios amplamente aceitos das simbioses para a eficiência nutricional (para macronutrientes, especialmente o P, e micronutrientes), o balanço hídrico, a proteção da planta aos estresses bióticos e abióticos. Há redes de hifas que interconectam plantas individuais dentro de uma comunidade vegetal. Isso pode ter implicações ecológicas e agrícolas significativas, uma vez que há evidência de que os fungos permitem a sinalização entre as plantas. As AMF também formam associações triplas com plantas e rizobactérias, que são relevantes em situações práticas de campo. Para desfrutar dos benefícios das associações micorrízicas, as práticas de manejo cultural e as cultivares plantadas devem estar adaptadas às interações com os microrganismos. A metagenômica é uma ferramenta interessante para monitorar e estudar as associações microbianas na rizosfera. A inoculação de propágulos de plantas e solos complementa essas abordagens.

Produtos à base de fungos, aplicados às plantas, promovem eficiência nutricional, tolerância a estresses, aumento da produção e melhoria na qualidade do produto colhido, devendo se enquadrar no conceito de bioestimulantes. As principais limitações do seu uso são a dificuldade técnica de propagar os AMF em larga escala, devido às suas características biotróficas, e, mais fundamentalmente, à falta de entendimento dos determinantes das especificidades dos hospedeiros e da dinâmica populacional das comunidades micorrízicas no agroecossistema. No entanto, outros endófitos fúngicos, como *Trichoderma* spp. (*Ascomycota*) e *Sebacinales* (*Basidiomycota*, com *Piriformospora indica* como organismo modelo), distintos das espécies micorrízicas, são habilitados a viver, ao menos uma parte do seu ciclo de vida, colonizando raízes e

transferindo nutrientes para os seus hospedeiros, usando mecanismos pouco conhecidos. Esses fungos estão recebendo cada vez mais atenção, tanto como inoculantes de plantas mais fáceis de serem multiplicados “*in vitro*” quanto como organismos modelo para esclarecer os mecanismos de transferência de nutrientes entre os endossimbiontes fúngicos e os seus hospedeiros. Alguns desses fungos, principalmente *Trichoderma* spp., têm sido extensivamente estudados e usados tanto para a sua capacidade como biopesticidas (micoparasítico) quanto para biocontrole (indutor de resistência às doenças), e têm sido explorados como fontes de enzimas pela indústria biotecnológica. Muitas outras respostas das plantas são também induzidas, incluindo aumento da tolerância aos estresses abióticos, da eficiência no uso dos nutrientes e do crescimento e da morfogênese de órgãos. Com base nesses efeitos, esses endófitos fúngicos podem ser considerados bioestimulantes, embora seus usos agrícolas sejam como biopesticidas.

- **Bactérias Benéficas**

As bactérias interagem com as plantas de todas as maneiras possíveis: (i) quanto aos fungos, há um “*continuum*” entre mutualismo e parasitismo”; (ii) os nichos bacterianos se estendem do solo até o interior das células, com locais intermediários chamados rizosfera e rizoplano; (iii) as associações podem ser transitórias ou permanentes, com algumas bactérias sendo até mesmo transmitidas verticalmente através da semente; e (iv) funções que influenciam a vida vegetal incluem: participação nos ciclos biogeoquímicos, fornecimento de nutrientes, aumento na eficiência do uso de nutrientes, indução de resistência a doenças, aumento da tolerância ao estresse abiótico e modulação da morfogênese por reguladores de crescimento vegetal.

Com relação ao uso de bioestimulantes na agricultura, dois tipos principais devem ser considerados dentro dessa diversidade taxonômica, funcional e ecológica: (i) endossimbiontes mutualísticos do tipo *Rhizobium* e (ii) PGPRs (rizobactérias promotoras do crescimento de plantas) rizosféricas e mutualísticas. O *Rhizobium* e os táxon relacionados são comercializados como biofertilizantes, isto é, inoculantes microbiológicos facilitadores da aquisição de nutrientes pelas plantas (veja glossário). As PGPRs são multifuncionais e influenciam todos os aspectos da vida das plantas: nutrição e crescimento, morfogênese e desenvolvimento, respostas a estresses bióticos e abióticos, interações com outros organismos no agroecossistema. Várias dessas funções são geralmente cumpridas pelos mesmos organismos. Muitas são cepa-específicas. Outras são dependentes de sinergismos dentro de consórcios bacterianos. O uso agrícola das PGPRs é limitado por essa complexidade, pelas respostas variáveis das cultivares de

plantas e pelo ambiente receptor. Também, as dificuldades técnicas, associadas com a formulação do inoculante, dão origem, na prática, a resultados inconsistentes. Apesar disso, o mercado mundial de bioestimulantes bacterianos está crescendo, e os inoculantes PGPRs são agora considerados como algum tipo de "probióticos" vegetais, ou seja, contribuidores eficientes para a nutrição e a imunidade das plantas.

Glossário: Biossoluções que contribuem para a produção vegetal sustentável:

Bioestimulante: Substância ou microrganismo que é aplicado às plantas com o objetivo de aumentar a eficiência nutricional, a tolerância a estresses abióticos e/ou as características de qualidade dos produtos colhidos, independentemente do seu teor de nutrientes. Por extensão, bioestimulantes vegetais também designam produtos comerciais contendo misturas de tais substâncias e/ou microrganismos.

Biofertilizante: É algum inoculante bacteriano ou fúngico aplicado às plantas com o objetivo de aumentar a disponibilidade de nutrientes e sua utilização, independentemente do teor de nutrientes do próprio inoculante. Biofertilizantes também podem ser definidos como bioestimulantes microbianos que melhoram a eficiência nutricional da planta.

Biocontrole: É o controle de um organismo pelo outro. Os agentes de biocontrole usados na produção vegetal são organismos vivos que protegem as plantas contra seus inimigos, isto é, reduzem a população de pragas ou doenças a níveis aceitáveis. O modo de ação pode incluir: competição, antibiose, parasitismo e, também, Redução Sistêmica Induzida, que é mediada pela própria planta.

Características Comuns dos Bioestimulantes

Uma designação comum de bioestimulantes só se justifica se as substâncias e microrganismos descritos compartilham algumas características importantes em relação às suas naturezas, funções e/ou usos. Tais características seriam então a base para qualquer definição.

(i) *A natureza dos bioestimulantes é diversa.* Substâncias e microrganismos estão envolvidos. As substâncias podem ser compostos simples (por exemplo, glicina betaína) ou grupos de compostos de origem natural única cuja composição e componentes bioativos não estão totalmente caracterizados (por exemplo, extratos de algas marinhas); as substâncias comentadas nesse trabalho são compostos orgânicos naturalmente produzidos, ou moléculas inorgânicas, mas compostos sintéticos não devem ser

excluídos, especialmente se certos reguladores do crescimento das plantas estão incluídos dentro de bioestimulantes (por exemplo, nitrofenolatos são descritos e comercializados como “bioestimulantes”, mas são compostos fenólicos sintéticos registrados como produtos para a produção vegetal). Os inoculantes microbianos podem conter linhagens únicas (por exemplo, de *Bacillus subtilis*) ou misturas de microrganismos que mostram efeitos aditivos ou sinérgicos (por exemplo, vários produtos disponíveis no mercado). Os bioestimulantes podem se referir aos ingredientes bioativos ou aos produtos comercializados que os combinam e que, muitas vezes, são adicionados aos fertilizantes ou aos produtos para a proteção das plantas.

(ii) *As funções fisiológicas são diversas.* Por função fisiológica entende-se qualquer ação sobre os processos vegetais. Exemplos de funções fisiológicas são a proteção da maquinaria fotossintética contra fotodanos ou a iniciação de raízes laterais. As funções são desempenhadas através de mecanismos celulares, como a eliminação reativa de oxigênio por antioxidantes ou o aumento da síntese de transportadores de auxina, respectivamente. As funções fisiológicas e os mecanismos celulares ligados a elas podem ser chamados, coletivamente, de “modos de ação” dos bioestimulantes. Finalmente, esses modos de ação explicam as funções agrícolas dos bioestimulantes, por exemplo, o aumento da tolerância ao estresse abiótico (causando estresse oxidativo), ou o aumento na eficiência do uso de N (que depende da capacidade de forrageamento das raízes, portanto, da densidade das raízes laterais). As funções agrícolas podem finalmente se traduzir em benefícios econômicos e ambientais: maior produção das culturas, economia de fertilizantes, maior qualidade e lucratividade dos produtos agrícolas e mais serviços ecossistêmicos.

(iii) Os efeitos cientificamente comprovados de todos os bioestimulantes convergem para *ao menos uma ou várias das seguintes funções agrícolas*: eles aumentam a eficiência nutricional, a tolerância aos estresses abióticos e/ou as características de qualidade dos produtos agrícolas. As características de qualidade podem se referir ao valor nutricional, ao teor de proteína dos grãos ou à vida de prateleira. Essas ações convergentes devem ser a base para qualquer definição de bioestimulantes. A estimulação da resposta do patógeno por elicitores e reguladores dos genes das plantas também é alcançada por muitos dos bioestimulantes descritos (quitosana, laminarina, alguns PGPRs).

(iv) A definição dos benefícios econômicos e ambientais depende das políticas agrícolas e ambientais, tanto em termos de objetivos quanto de pontos-de-vista de avaliação. Embora os incentivos para o desenvolvimento de bioestimulantes estejam ligados a esses aspectos, eles não devem ser a base para uma definição baseada na ciência.

Concluindo, qualquer definição de bioestimulantes deve se concentrar nas suas funções agrícolas, não na natureza dos seus constituintes nem em seus modos de ação.

Definindo Bioestimulantes Vegetais: Visando um Consenso

Em consonância com as considerações acima, propõe-se a seguinte definição (Glossário):

« Um bioestimulante vegetal é qualquer substância ou microrganismo aplicado às plantas com o objetivo de aumentar a eficiência nutricional, a tolerância aos estresses abióticos e/ou as características de qualidade do produto colhido. » Essa definição pode ser complementada por: « Por extensão, bioestimulantes vegetais são designados de produtos comerciais contendo mistura de tais substâncias e/ou de microrganismos. »

Algumas observações:

(i) A natureza do bioestimulante não é restritiva: pode ser uma substância ou um microrganismo. Uma substância pode ser um único composto químico ou um grupo de compostos tendo uma origem biológica bem estabelecida, por exemplo, extratos vegetais, mas não necessariamente uma composição totalmente caracterizada. Os extratos vegetais também podem ser chamados de “substâncias botânicas ativas” ou “substâncias básicas”. “Uma ‘substância botânica ativa’ consiste de um ou mais componentes obtidos submetendo plantas da mesma espécie ou partes delas a processos como prensagem, moagem, esmagamento, destilação e/ou extrações”. Os microrganismos devem ser identificados ao nível de linhagem, considerando que muitas atividades biológicas são de fato “específicas da linhagem”. Quando misturas intencionais de microrganismos são usadas, os produtos resultantes são referidos como bioestimulantes.

(ii) As funções agrícolas formam o cerne da definição. Bioestimulantes são definidos pelos resultados agrícolas pretendidos. A “eficiência nutricional” pode abranger a

mobilização e a absorção do solo, o desenvolvimento das raízes, o transporte, o armazenamento e a assimilação (ou seja, a conversão da forma inorgânica para a orgânica) dos nutrientes na planta. O “estresse abiótico” se refere a algum estressor físico ou químico, de origem não biológica (seca, salinidade, calor). As “características de qualidade do produto colhido” podem ser diversas e variar de valor nutricional à vida de prateleira ou pigmentação da flor. Qualquer um desses efeitos deve ser distinguido daqueles resultantes do teor de nutrientes do produto. Os bioestimulantes não são fertilizantes, no sentido de que eles não contêm nutrientes destinados a serem absorvidos pelas plantas. No entanto, eles podem facilitar a aquisição dos nutrientes, por exemplo, pela mobilização de elementos na rizosfera ou pelo desenvolvimento de novas rotas de aquisição de nutrientes, como a fixação atmosférica de N pelas bactérias endossimbiontes.

(iii) “Bioestimulantes vegetais contêm substâncias e/ou microrganismos cuja função, quando aplicado às plantas ou à rizosfera, é estimular os processos naturais e aumentar/beneficiar a absorção de nutrientes, a eficiência nutricional, a tolerância aos estresses abióticos e à qualidade do produto colhido”. No entanto, o termo “bioestimulantes aplicados à rizosfera” pode ter o mesmo sentido que “aplicados às plantas” (fertilizantes e agrotóxicos podem ser descritos como sendo aplicados às plantas, quando na verdade eles podem ser aplicados nas plantas e no solo, incluindo a rizosfera). Ao dizer “aplicado às plantas”, a nossa intenção não é ser restritivo, ao contrário, é se referir a todos os modos de aplicação visando alcançar a planta no final. Além do mais, um bioestimulante é definido como sendo primariamente a substância e/ou o microrganismo que exerce algum efeito, não que contém substância ou microrganismo. Bioestimulante designa a substância ativa ou o microrganismo em primeiro lugar e, em segundo, qualquer preparação comercial que os contenha.

Considerações Finais

O futuro dos bioestimulantes vegetais deve ser impulsionado pelas seguintes linhas de ação:

Do laboratório para o campo: entende-se que a fisiologia vegetal hoje está melhor do que nunca graças aos avanços científicos e tecnológicos em muitas áreas desse conhecimento nas últimas décadas. A maioria dessas conquistas usou um número limitado de organismos modelo em ambientes controlados. Um desafio agora é usar esse

conhecimento e essas ferramentas para a caracterização de bioestimulantes e seus efeitos em muitas das plantas cultivadas. Por exemplo, plataformas de fenotipagem de plantas de alto rendimento foram desenvolvidas para a caracterização de mutantes produzidos em estudos de genômica funcional, mas elas estimulam estudos para entender os modos de ação dos bioestimulantes e suas interações com estressores ambientais e genótipos de plantas. Preencher a lacuna entre muitos dados de laboratório sobre bioestimulantes individuais e dados de campo sobre misturas (muitas vezes combinados com fertilizantes) é igualmente desafiador e importante. Como exemplo, a promoção do crescimento das raízes por bactérias do solo pode ser consistentemente demonstrada em condições de laboratório (Figura 1), mas isso diz pouco sobre possíveis efeitos benéficos em situações práticas de campo.

Figura 1 - Indução da formação de raízes laterais em mudas da gramínea *Brachypodium distachyon* (linhagem Bd21) por compostos voláteis emitidos pela PGPR *Bacillus pumilus* C26, co-cultivado em uma placa vertical dentro de uma atmosfera compartilhada (Delaplace *et al.*, 2015).



Diagramação: Sérgio Cobel da Silva.

Do campo para o laboratório: o desenvolvimento de bioestimulantes pode seguir uma abordagem “farmacológica” clássica, onde substâncias ativas ou microrganismos são selecionados em condições controladas e um procedimento gradual é seguido para selecionar candidatos promissores, passando do laboratório a condições mais realistas. Isso pode ser eficiente, mas a seleção rigorosa e gradual de substâncias ativas ou microrganismos resulta em altos custos de desenvolvimento que são dificilmente justificados em setores do mercado que criam valor agregado limitado, como em nutrição de plantas e agricultura. Um caminho alternativo seria começar das observações de campo e levar de volta ao laboratório para a sistematização das questões científicas levantadas. Para dar um exemplo, microbiologistas e ecologistas de solo estão apontando a variabilidade na maneira como cultivares de plantas individuais interagem com bactérias rizosféricas e modulam a composição das populações bacterianas, mesmo durante o período de crescimento de uma cultura anual como o milho. Se essas mudanças dependentes do genótipo no microbioma da rizosfera impactam o crescimento e a saúde das plantas, é uma questão em aberto. Tais observações podem ser um ponto de partida para entender as chaves para interações bem-sucedidas entre PGPRs e plantas. De um ponto de vista mais prático, novas abordagens comerciais estão sendo desenvolvidas, as quais visam ampliar a microbiota benéfica local ao invés de inocular produtos microbianos padronizados. Essa abordagem é motivada pelo fato empírico de que um fator limitante, quando se usa bioestimulantes microbianos, é a capacidade do inoculante de se estabelecer e se manter em atividade suficiente na rizosfera. Um paralelo pode ser feito com a microbiota intestinal na medicina humana: adicionar inoculantes (ou seja, “probióticos”) é uma coisa, mas alimentar as bactérias benéficas com probióticos é mais interessante. Benefícios à saúde podem ser obtidos usando-se apenas probióticos que modulam o microbioma intestinal. Isso inspira novos caminhos para o manejo sustentável das culturas, desenvolvendo novos fertilizantes e criando plantas com capacidade aumentada de “gerenciar” suas microbiotas rizosférica e endosférica.

O uso de bioestimulantes pela agricultura e pela horticultura requer soluções adaptadas no espaço e no tempo. Ferramentas de monitoramento para a eficácia dos bioestimulantes serão necessárias e planos de administração que otimizem seu uso devem ser definidos. Efeitos de longo prazo, por meio de serviços ecológicos e ciclos biogeoquímicos, também devem ser avaliados e integrados no processo de tomada de decisão na propriedade. As empresas que desenvolvem bioestimulantes terão que

contribuir para soluções integradas aos níveis de agrossistema, propriedade e paisagem, dos quais esses produtos são apenas um elemento. O envolvimento de partes interessadas, a saber, agricultores, pesquisadores e órgãos reguladores será necessário para colher os benefícios que os bioestimulantes podem trazer para produções lucrativas e sustentáveis.

Referências Bibliográficas

BACKER, R.; ROKEM, J. S.; ILANGUMARAN, G.; LAMONT, J.; PRASLICKOVA, D.; RICCI, E.; SUBRAMANIAN, S.; SMITH, D. L. Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, art. 1473, 2018.

BROWN, P.; SAA, S. Bioestimulants in agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, art. 167, 2015.

CHABILI, A.; MINAOUI, F.; HAKKOUN, Z.; DOUMA, M.; MEDDICH, A.; LOUDIKI, M. A comprehensive review of microalgae and cyanobacteria-based biostimulants for agriculture uses. **Plants**, v. 13, n. 2, 159, 2024.

DELAPLACE, P.; DELORY, B. M.; BAUDSON, C.; CAZENAVE, M. M.; De SPAEPEN, S.; VARIN, S.; BROSTAU, Y.; Du JARDIN, P. Influence of rhizobacterial volatiles on the root system architecture and the production and allocation of biomass in the model grass *Brachypodium distachyon* (L.) P. Beauv. **Plant Biology**, v. 5, n. 195, 2015.

Du JARDIN, P. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. **Scientia Horticulturae**, v. 196, p. 3-14, 2015.

JIMÉNEZ-ARIAS, D.; MORALES-SIERRA, S.; SILVA, P.; CORRÊLO, H.; GONÇALVES, A.; GANANÇA, J. F. T.; NUNES, N.; GOUVEIA, C. S. S.; ALVES, S.; BORGES, J. P.; CARVALHO, M. Â. A. P. de. Encapsulation with natural polymers to improve the properties of biostimulants in agriculture. **Plants**, v. 12, n. 1, 55, 2022.

KAUSHAL, P.; ALI, N.; SAINI, S.; PATI, P. K.; PATI, A. M. Physiological and molecular insight of microbial biostimulants for sustainable agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, e1041413, 2022.

KERGOSIEN, N.; STIGER-POUVREAU, V.; CONNAN, S.; HANNEQUART, F.; BRÉBION, J. Mini-Review: brown macroalgae as a promising raw material to produce biostimulants for the agriculture sector. **Frontiers in Agronomy**, v. 5, e1109989, 2023.

KUMARI, S.; SEHRAWAT, K. D.; PHOGAT, D.; SEHRAWAT, A. R.; CHAUDHARI, R.; SUSHKOVA, S. N.; VOLOSHINA, M. S.; RAJPUT, V. D.; SHMARAEVA, A. N.; MARC, R. A.; SHENDE, S. S. *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jolis, a pivotal biostimulant toward sustainable agriculture: A comprehensive review. **Agriculture**, v. 13, 1179, 2023.

MAGNABOSCO, P.; MAIS, A.; SHUKLA, R.; BANSAL, V.; CARLETTI, P. Advancing the impact of plant biostimulants to sustainable agriculture through nanotechnologies. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 10, 117, 2023.

MORENO-HERNÁNDEZ, J. M.; BENÍTEZ-GARCÍA, I. MAZORRA-MANZANO, M. A.; RAMÍREZ-SUÁREZ, J. C.; SÁNCHEZ, E. Strategies for production, characterization and application of protein-based biostimulants in agriculture: A review. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 80, n. 2, p. 274-289, 2020.

ROUPHAEL, Y.; COLLA, G. Editorial: Bioestimulants of agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, art. 4, 2020.

ROUPHAEL, Y.; COLLA, G. Synergistic biostimulatory action: Designing the next generation of plant biostimulants for sustainable agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, art. 1655, 2018.

RUZZI, M.; COLLA, G.; ROUPHAEL, Y. Editorial: Bioestimulants of agriculture II: towards a sustainable future. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, e1427283, p. 1-7, 2024.

SOUSA, A. S. de; OLIVEIRA, G. S. de; ALVES, L. H. A pesquisa bibliográfica: princípios e fundamentos. **Cadernos da Funcamp**, v. 20, n. 43, p. 64-83, 2021.

WOO, S. L.; PEPE, O. Microbial consortia: Promising probiotics as plant biostimulants for sustainable agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, art. 1801, 2018.

CAPÍTULO 11

ESTRATÉGIAS DE ADAPTAÇÃO FISIOLÓGICA EM PLANTAS DE DIFERENTES AMBIENTES

PHYSIOLOGICAL ADAPTATION STRATEGIES IN PLANTS FROM DIFFERENT ENVIRONMENTS

DOI: <https://doi.org/10.56001/24.9786500981315.11>

Submetido em: 13/01/2025

Revisado em: 21/01/2025

Publicado em: 28/01/2025

Jordana Caroline Nagel

Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo-RS

<http://lattes.cnpq.br/1544914259635851>

Resumo

O estudo explora as estratégias que as plantas utilizam para se adaptar a diferentes ambientes, como regiões áridas, salinas, aquáticas e áreas impactadas pelas mudanças climáticas. A análise foi realizada com base em uma revisão bibliográfica (2020-2024), usando fontes reconhecidas, e destaca mecanismos como o metabolismo CAM, raízes profundas, uso de bicarbonato e epigenética. Em áreas áridas, por exemplo, as plantas desenvolvem adaptações como cutículas mais grossas e folhas menores para reduzir a perda de água. Já em ambientes salinos, elas contam com soluções como glândulas que eliminam o excesso de sal e a capacidade de isolar íons em compartimentos específicos. Nos habitats aquáticos, a formação de aerênquimas e o uso de bicarbonato ajudam as plantas a otimizar a fotossíntese em condições desafiadoras. O papel da epigenética se sobressai ao demonstrar como as plantas conseguem regular seus genes em resposta a condições adversas. Essa habilidade permite a criação de uma “memória ambiental”, que pode ser passada para as próximas gerações, ajudando as plantas a lidar melhor com o estresse no futuro. Essas adaptações são essenciais para a sobrevivência das plantas e influenciam diretamente a conservação da biodiversidade, o desenvolvimento de práticas agrícolas mais eficazes e a redução dos efeitos das mudanças climáticas. O estudo conclui ressaltando a importância de integrar novas tecnologias e práticas de manejo cuidadoso como parte de estratégias globais para proteger os ecossistemas e enfrentar os desafios ambientais.

Palavras-Chave: Adaptações fisiológicas; Epigenética; Metabolismo CAM; Biodiversidade; Mudanças climáticas.

Abstract

The study explores the strategies plants use to adapt to different environments, such as arid, saline, aquatic regions, and areas impacted by climate change. The analysis was based on a literature review (2020–2024) using recognized sources and highlights mechanisms such as CAM metabolism, deep roots, bicarbonate use, and epigenetics. In arid regions, for instance, plants develop adaptations like thicker cuticles and

smaller leaves to reduce water loss. In saline environments, they employ solutions such as glands that expel excess salt and the ability to isolate ions in specific compartments. In aquatic habitats, the formation of aerenchyma and the use of bicarbonate help plants optimize photosynthesis under challenging conditions. The role of epigenetics stands out by demonstrating how plants can regulate their genes in response to adverse conditions. This ability enables the creation of an “environmental memory” that can be passed on to future generations, helping plants better cope with stress in the future. These adaptations are essential for plant survival and directly influence biodiversity conservation, the development of more efficient agricultural practices, and the mitigation of climate change effects. The study concludes by emphasizing the importance of integrating new technologies and careful management practices as part of global strategies to protect ecosystems and address environmental challenges.

Keywords: Physiological Adaptations; Epigenetics; CAM Metabolism; Biodiversity; Climate Change.

Introdução

Ao longo de sua evolução, as plantas desenvolveram uma incrível habilidade de se adaptar aos mais variados tipos de ambientes, que vão desde os desertos secos até as florestas tropicais úmidas. Essas adaptações, tanto fisiológicas quanto anatômicas, são essenciais para que elas consigam sobreviver e se reproduzir mesmo em condições desfavoráveis. Por exemplo, em regiões semiáridas como a Caatinga brasileira, é comum encontrar plantas com folhas endurecidas, cutículas grossas que reduzem a transpiração e raízes profundas capazes de alcançar água nas camadas mais distantes do solo (Silva *et al.*, 2022). Essas características mostram como a forma e a estrutura das plantas estão intimamente ligadas ao ambiente onde vivem.

A capacidade de ajustar sua forma e funcionamento, conhecida como plasticidade fenotípica, é outro mecanismo importante que permite às plantas se adaptar a mudanças no ambiente. Estudos feitos por Souza e Lima (2021) com espécies de *Eucalyptus*, por exemplo, revelaram alterações na espessura da cutícula e na quantidade de estômatos das folhas, dependendo da intensidade da luz recebida. Essa flexibilidade é essencial em lugares onde as condições mudam com frequência, como nas variações sazonais de luz ou disponibilidade de água, ajudando as plantas a ajustarem seus processos de forma mais eficiente.

Nos habitats aquáticos, os desafios são diferentes. A limitação de carbono inorgânico para a fotossíntese, por exemplo, exige soluções específicas. Pesquisas realizadas por Oliveira e Santos (2023) apontam que algumas plantas utilizam bicarbonato (HCO_3^-) e desenvolvem folhas que emergem acima da água, estratégias que aumentam a captura de CO_2 e tornam a fotossíntese mais eficiente nesses cenários. Essas

adaptações são essenciais para que essas espécies consigam prosperar em ambientes tão particulares.

Com as mudanças climáticas avançando, as plantas têm enfrentado pressões ambientais cada vez mais intensas, o que exige respostas rápidas e eficientes. Nesse contexto, o campo da epigenética vem ganhando atenção por ajudar a entender como essas respostas acontecem. Lima *et al.* (2024) demonstraram que mecanismos epigenéticos, como a metilação do DNA, são fundamentais para ajustar a expressão dos genes diante de situações de estresse, permitindo que as plantas se adaptem sem que suas sequências genéticas sejam alteradas. Além disso, algumas dessas modificações podem ser transmitidas às próximas gerações, ajudando futuras populações a lidar melhor com os desafios ambientais.

Ao compreender essas estratégias de adaptação é crucial não apenas para a ecologia e a evolução das plantas, mas também para aplicações práticas, como o desenvolvimento de técnicas agrícolas mais eficientes e a preservação dos ecossistemas. Com o agravamento das mudanças climáticas, esse conhecimento se torna ainda mais importante para reduzir os impactos nos ecossistemas ao redor do mundo (Ferreira *et al.*, 2023).

Metodologia

Este estudo analisou de forma detalhada as estratégias de adaptação fisiológica de plantas em diferentes tipos de ambientes, utilizando uma revisão bibliográfica criteriosa. A pesquisa foi realizada em fontes científicas confiáveis, como *Scopus*, *Web of Science*, *Science Direct* e *Google Scholar*, priorizando materiais publicados entre 2020 e 2024. Foram usados termos de busca como "adaptação fisiológica de plantas", "mudança climática e vegetação", "estratégias em plantas xerófitas", "epigenética em plantas" e "adaptação de plantas aquáticas".

Os critérios de inclusão envolveram artigos originais, revisões e capítulos de livros acadêmicos que abordassem diretamente os mecanismos de adaptação fisiológica e anatômica das plantas a fatores ambientais, como seca, salinidade, alagamento e mudanças climáticas. Foram considerados apenas trabalhos publicados em inglês, espanhol ou português, que apresentassem relevância científica e metodologias bem fundamentadas.

No total, 120 documentos foram identificados inicialmente. Após a análise de títulos e resumos, 50 artigos que atendiam aos critérios definidos foram selecionados para

uma leitura mais aprofundada. A partir dessa etapa, realizou-se uma análise detalhada para coletar informações sobre os mecanismos de adaptação, que foram organizados em quatro categorias principais: adaptações a ambientes áridos, salinos, aquáticos e frios.

Além disso, a revisão incluiu uma análise de tendências mais recentes, como o impacto da epigenética na adaptação das plantas, destacando estudos que exploram os processos moleculares envolvidos nessas respostas fisiológicas. Todo o trabalho foi conduzido com base em princípios éticos de pesquisa, garantindo rigor acadêmico e a integridade de cada etapa do processo.

Desenvolvimento

As plantas que habitam ambientes áridos apresentam adaptações fisiológicas notáveis, demonstrando como a evolução desempenha um papel crucial na definição de estratégias para sobreviver em condições extremas. Espécies xerofíticas, como *Opuntia ficus-indica* e *Prosopis juliflora*, destacam-se por características adaptativas específicas, como cutículas espessas, folhas reduzidas ou transformadas em espinhos, além do uso do Metabolismo Ácido das Crassuláceas (MAC) (Costa *et al.*, 2023). Essas adaptações reduzem significativamente a perda de água, permitindo que essas plantas sobrevivam em regiões marcadas por baixa precipitação e altas taxas de evapotranspiração.

A intensificação das mudanças climáticas tem exacerbado episódios de seca e temperaturas extremas, acelerando o processo de desertificação em áreas que antes eram habitáveis. Nesse contexto, torna-se essencial adotar estratégias de conservação e restauração para assegurar a sobrevivência dessas espécies. Elas desempenham funções indispensáveis, como a preservação da biodiversidade, a estabilização dos solos e a prevenção da erosão, contribuindo diretamente para a sustentabilidade dos ecossistemas áridos.

O metabolismo CAM (Metabolismo Ácido das Crassuláceas) é um exemplo de ajuste bioquímico altamente eficiente, que possibilita às plantas xerofíticas otimizar a fixação de carbono em condições de escassez hídrica. Como observado em cactos e bromélias, esse mecanismo permite que a absorção de CO₂ ocorra durante a noite, quando as temperaturas são mais baixas e a transpiração é minimizada, resultando em uma menor perda de água (Santos *et al.*, 2022).

Embora o metabolismo CAM seja amplamente eficaz em espécies nativas, sua aplicação no contexto de cultivares comerciais enfrenta desafios significativos. Entre eles estão os altos custos energéticos necessários para manter esse ciclo e a complexidade das

interações genéticas envolvidas. Apesar dessas limitações, o estudo do metabolismo CAM no desenvolvimento de culturas agrícolas adaptadas a ambientes áridos representa uma oportunidade promissora para mitigar os impactos de crises hídricas em escala global.

Outro mecanismo crítico de adaptação observado em plantas de climas áridos é o desenvolvimento de sistemas radiculares profundos. Essas raízes, que podem atingir lençóis freáticos a profundidades superiores a 10 metros, garantem o acesso a recursos hídricos subterrâneos durante longos períodos de seca (Ferreira e Lima, 2023). Espécies como *Acacia tortilis* exemplificam essa estratégia, não apenas garantindo sua sobrevivência, mas também contribuindo para a redistribuição de água no solo, o que beneficia outras plantas no entorno.

A superexploração dos aquíferos por atividades humanas, como a agricultura intensiva e a urbanização, tem interrompido o equilíbrio ecológico e ameaçado a preservação desses ecossistemas. Essa interferência compromete não apenas as espécies adaptadas, mas também os serviços ecossistêmicos indispensáveis que elas oferecem. Assim, a gestão sustentável dos recursos hídricos é indispensável para proteger tanto a biodiversidade quanto os processos ecológicos associados.

Em ambientes salinos, como manguezais e áreas costeiras, as plantas enfrentam desafios significativos, incluindo a toxicidade causada pelo excesso de íons e o estresse osmótico. De acordo com Oliveira e Souza (2022), espécies halofíticas, como *Avicennia marina*, desenvolveram glândulas especializadas que excretam o sal em excesso, protegendo seus tecidos internos. Essas adaptações não apenas asseguram a sobrevivência em solos altamente salinos, mas também desempenham funções ecológicas cruciais, como a redução da erosão costeira e a oferta de habitat para diversas espécies da fauna local. O agravamento da salinização dos solos agrícolas, intensificado pelas mudanças climáticas e por práticas inadequadas de irrigação, reforça a necessidade de estratégias inovadoras para mitigar esses impactos e garantir a segurança alimentar global.

Outra adaptação marcante das plantas halofíticas é a capacidade de armazenar íons nos vacúolos celulares, evitando a toxicidade no citoplasma. Conforme apontam Santos *et al.* (2021), embora esse mecanismo envolva um alto custo energético, ele é essencial para manter a estabilidade fisiológica em ambientes salinos. No entanto, com o aumento da salinização dos solos em escala global, as limitações dessa estratégia têm se tornado mais evidentes.

Nesse cenário, a engenharia genética surge como uma abordagem promissora para introduzir essas características adaptativas em cultivares agrícolas. Contudo, a implementação em larga escala dessa tecnologia requer uma análise cuidadosa de questões éticas, econômicas e ambientais. Esse debate é fundamental para assegurar que o uso da engenharia genética seja viável, eficiente e alinhado com práticas sustentáveis.

Por outro lado, em ambientes aquáticos, plantas submersas enfrentam desafios únicos, como a baixa disponibilidade de oxigênio e a redução da penetração de luz. As espécies como *Hydrilla verticillata* desenvolveram estruturas especializadas chamadas aerênquimas, que facilitam a troca de gases nos tecidos. Essas estruturas permitem que a fotossíntese ocorra mesmo em condições de baixa concentração de oxigênio, garantindo a sobrevivência dessas plantas em ambientes hipóxicos (Ferreira e Lima, 2023).

Embora as adaptações das plantas aquáticas sejam notavelmente eficientes, elas ainda se mostram insuficientes frente aos impactos crescentes da poluição e da eutrofização, que comprometem gravemente a qualidade da água e colocam em risco a sobrevivência dessas espécies. Nesse cenário, a implementação de políticas ambientais mais rigorosas é indispensável para a conservação desses habitats e das funções ecológicas que eles desempenham.

Entre as adaptações bioquímicas observadas em plantas aquáticas, destaca-se a capacidade de utilizar bicarbonato como fonte alternativa de carbono para a fotossíntese. Como sugerido por Almeida *et al.* (2024), essa estratégia se mostra particularmente eficaz em ambientes eutróficos, onde a disponibilidade de dióxido de carbono dissolvido é reduzida.

A intensificação da poluição das águas e as alterações nos regimes de inundação representam sérias ameaças à eficácia dessas adaptações, colocando em risco a viabilidade de diversas espécies aquáticas. Diante disso, é urgente a adoção de medidas de preservação e práticas de manejo sustentável para mitigar esses impactos e assegurar a continuidade das funções ecológicas desses ambientes.

A epigenética tem se destacado como uma área crucial para compreender como as plantas respondem a estresses ambientais em rápida evolução. Modificações epigenéticas, como a metilação do DNA, permitem que as plantas ajustem a expressão gênica em resposta a condições adversas sem que ocorram alterações permanentes na sequência genética (Almeida *et al.*, 2024).

Esse mecanismo confere uma flexibilidade adaptativa significativa, possibilitando que as plantas reajam de forma ágil às mudanças ambientais. Além disso, tais

modificações podem ser herdadas pelas gerações subsequentes, criando uma "memória ambiental" que fortalece as populações vegetais e aumenta sua capacidade de enfrentar condições extremas.

Apesar da eficiência desse processo, a eficácia das modificações epigenéticas é limitada diante do ritmo acelerado das mudanças climáticas. Ferreira e Lima (2023) apontam que, em muitos casos, a velocidade das transformações ambientais supera a capacidade adaptativa das plantas, colocando em risco a sobrevivência de ecossistemas inteiros.

Diante dos desafios cada vez maiores impostos pelas mudanças climáticas, é essencial adotar uma abordagem integrada que combine avanços tecnológicos, como a engenharia genética, com ações voltadas à preservação e restauração de habitats naturais. Essa combinação pode ser decisiva para mitigar os impactos ambientais e fortalecer a resiliência dos ecossistemas, que estão cada vez mais ameaçados. No entanto, para que essas estratégias sejam eficazes, é necessário equilibrar inovação científica com sustentabilidade ambiental, garantindo que os benefícios sejam duradouros.

Os impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura evidenciam a urgência de desenvolver culturas mais adaptáveis a condições adversas, como seca e salinidade. Pesquisas indicam que adaptações fisiológicas observadas em plantas silvestres, como o metabolismo CAM ou raízes profundas, podem ser incorporadas em plantas cultivadas para aumentar sua tolerância a estresses ambientais (Santos *et al.*, 2021). Essa possibilidade abre caminhos promissores, mas sua implementação requer mais do que apenas avanços tecnológicos: é preciso considerar questões econômicas, sociais e éticas, além de realizar investimentos significativos em pesquisa e desenvolvimento para garantir que essas soluções sejam sustentáveis e aplicáveis em larga escala.

Apesar do potencial dessas inovações, sua aplicação enfrenta desafios consideráveis. A introdução do metabolismo CAM em cultivares comerciais, por exemplo, poderia melhorar a eficiência no uso da água, tornando essas plantas mais adequadas para regiões áridas (Costa *et al.*, 2023). Contudo, existem limitações importantes, como a complexidade genética envolvida e o alto custo energético desse mecanismo. Além disso, é necessário avaliar os riscos ecológicos e éticos que podem surgir com a manipulação genética, como a possibilidade de interferência nos ecossistemas locais e competição com espécies nativas. Esses desafios destacam a importância de abordar essas inovações de maneira equilibrada, assegurando que os avanços tecnológicos não comprometam a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos.

O papel das plantas na manutenção dos serviços ecossistêmicos é central, especialmente em tempos de mudanças climáticas. Espécies que se adaptaram a condições extremas, como halófitas e xerófitas, desempenham funções vitais, incluindo a proteção contra a erosão do solo, a regulação do ciclo hídrico e o sequestro de carbono (Pereira *et al.*, 2023). Esses serviços são indispensáveis para a estabilidade ambiental e o bem-estar humano, demonstrando a relevância das plantas não apenas para os ecossistemas naturais, mas também para as atividades humanas que deles dependem.

Infelizmente, a degradação de habitats naturais, muitas vezes causada por ações humanas como o desmatamento, a expansão da agricultura e a urbanização desordenada, ameaça seriamente essas funções ecológicas. Sem medidas efetivas de conservação e manejo sustentável, tanto os ecossistemas quanto as populações humanas estarão cada vez mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas. Nesse contexto, é fundamental que políticas públicas sejam implementadas com urgência, promovendo a preservação dos recursos naturais e assegurando o equilíbrio entre o uso humano e a proteção ambiental.

A conservação de plantas aquáticas enfrenta desafios particularmente complexos, já que esses ecossistemas são altamente vulneráveis aos impactos das atividades humanas. Como apontam Ferreira e Lima (2023), fatores como poluição, eutrofização e alterações nos regimes de inundação afetam não apenas a biodiversidade, mas também os serviços ecossistêmicos essenciais fornecidos por essas plantas, incluindo a purificação da água e o suporte à fauna aquática. Esses impactos reforçam a urgência de estratégias eficazes de preservação, que considerem tanto a proteção das espécies quanto a manutenção das funções ecológicas associadas.

O avanço de tecnologias emergentes, como drones e sensores ambientais, tem aberto novas possibilidades para o monitoramento e a gestão de ecossistemas vegetais. De acordo com Almeida *et al.* (2024), essas ferramentas podem ser empregadas para identificar áreas prioritárias para a conservação, avaliar os efeitos das atividades humanas e até prever os impactos das mudanças climáticas. Essa precisão tecnológica representa um passo importante para uma gestão mais eficiente dos recursos naturais, permitindo ações direcionadas e baseadas em dados concretos.

No entanto, o sucesso dessas tecnologias depende de sua integração com práticas tradicionais de manejo e, principalmente, do envolvimento das comunidades locais no processo de conservação. Apenas por meio de uma abordagem combinada, que valorize o conhecimento técnico e o saber local, será possível implementar ações realmente

eficazes e sustentáveis. Essa colaboração entre tecnologia, práticas convencionais e engajamento comunitário é um componente indispensável para o sucesso na preservação dos ecossistemas aquáticos.

Apesar dos avanços no entendimento das adaptações fisiológicas das plantas, ainda há muitas questões a serem exploradas. Estudos futuros precisam investigar de forma mais aprofundada como diferentes tipos de estresses ambientais, como seca e salinidade, interagem entre si e afetam a capacidade adaptativa das plantas. Essa lacuna no conhecimento limita a compreensão da complexidade das respostas vegetais a condições ambientais adversas, o que, por sua vez, dificulta o desenvolvimento de soluções de manejo mais eficientes.

Além disso, como ressaltam Santos *et al.* (2021), estratégias de gestão que não considerem a complexidade dos sistemas naturais correm o risco de gerar soluções inadequadas ou até prejudiciais. Por isso, a integração de diferentes áreas do conhecimento é fundamental para o planejamento de intervenções mais eficazes. Somente uma abordagem holística permitirá lidar com a diversidade de fatores que influenciam os ecossistemas e sua conservação.

As mudanças climáticas também evidenciam a relevância da variabilidade genética para a resiliência das populações vegetais. Segundo Ferreira e Lima (2023), essa diversidade genética é essencial para que as plantas possam se adaptar a condições ambientais em constante transformação. Entretanto, a fragmentação de habitats e o uso intensivo do solo têm reduzido significativamente essa variabilidade, ameaçando a sobrevivência de muitas espécies.

Diante desse contexto, os esforços de conservação devem focar na proteção dos habitats naturais e na preservação do banco genético das plantas, assegurando sua capacidade de adaptação aos desafios ambientais que estão por vir. Essa abordagem é indispensável para fortalecer a manutenção das espécies e garantir sua funcionalidade nos ecossistemas.

No setor agrícola, as adaptações fisiológicas das plantas têm mostrado grande potencial para solucionar problemas relacionados à produção em ambientes desafiadores. Um exemplo claro é a seleção de cultivares tolerantes à seca, que já demonstrou resultados promissores em regiões áridas. Contudo, como apontado por Oliveira e Souza (2022), a adoção dessas inovações exige um equilíbrio entre produtividade e custo, além do suporte de políticas públicas que viabilizem sua aplicação em comunidades agrícolas

mais vulneráveis. Essas medidas são cruciais para que os avanços cheguem de forma acessível e gerem benefícios concretos para produtores e ecossistemas.

A restauração de ecossistemas degradados também pode se beneficiar diretamente do entendimento das adaptações das plantas. Espécies adaptadas a ambientes extremos, como as halófitas, desempenham um papel significativo na recuperação de solos salinizados, auxiliando na recuperação da fertilidade e na reabilitação de áreas agrícolas improdutivas (Pereira *et al.*, 2023). Contudo, para que essas intervenções sejam eficazes, é necessário um planejamento abrangente que leve em consideração aspectos ecológicos, sociais e econômicos. Apenas com essa abordagem integrada será possível alcançar resultados duradouros e benéficos para todas as partes envolvidas.

A aplicação do conhecimento sobre as adaptações das plantas em conjunto com avanços tecnológicos representa uma oportunidade de longo prazo para lidar com os desafios ambientais globais. A bioengenharia, por exemplo, oferece possibilidades promissoras para o desenvolvimento de plantas mais tolerantes a diferentes estresses ambientais. Como destacado por Almeida *et al.* (2024), essas inovações precisam ser acompanhadas por regulamentações rigorosas que garantam a segurança ambiental e evitem possíveis impactos negativos. O objetivo deve ser assegurar que essas tecnologias atendam tanto às necessidades dos ecossistemas quanto às das comunidades humanas, minimizando riscos e promovendo equilíbrio.

A diversidade fenotípica das plantas em zonas áridas revela uma complexidade que desafia a visão tradicional de que esses ambientes limitam a variação morfológica. Rodríguez *et al.* (2024) observaram que, em condições extremas de seca, as plantas desenvolvem uma ampla gama de formas e tamanhos, sugerindo que a escassez de água pode, surpreendentemente, favorecer a diversidade funcional. Isso reflete como a pressão seletiva em regiões áridas promove estratégias adaptativas variadas, permitindo a coexistência de espécies distintas e contribuindo para a estabilidade dos ecossistemas. No entanto, com a intensificação das mudanças climáticas, esses delicados equilíbrios estão cada vez mais ameaçados, reforçando a importância de revisar as estratégias de conservação nessas áreas vulneráveis.

Em ecossistemas como a Caatinga brasileira, as plantas possuem adaptações específicas que lhes permitem sobreviver a longos períodos de seca. Fahn e Cutler (1992) destacam que características como cutículas espessas, sistemas radiculares profundos e mecanismos que reduzem a perda de água são essenciais para o sucesso dessas espécies em condições tão adversas. Compreender essas adaptações é fundamental para

desenvolver práticas de manejo eficazes e conservar a biodiversidade em regiões suscetíveis à desertificação.

Além das adaptações estruturais, as interações das plantas com microrganismos do solo desempenham um papel importante na sobrevivência em ambientes extremos. Hernández-Álvarez *et al.* (2021) investigaram o microbioma radicular de abóboras (*Cucurbita pepo* L.) em condições áridas e descobriram que determinados microrganismos são capazes de melhorar a tolerância à seca das plantas. Esses resultados destacam o potencial do microbioma como aliado em estratégias agrícolas e de conservação, especialmente em cenários de escassez hídrica.

Os microrganismos desempenham um papel essencial ao auxiliar as plantas na absorção de nutrientes e na regulação do estresse hídrico, evidenciando a importância das interações entre plantas e microrganismos na adaptação a condições ambientais adversas. Nesse contexto, a manipulação do microbioma radicular emerge como uma estratégia promissora para aumentar a capacidade das culturas agrícolas de enfrentar os desafios associados às mudanças climáticas.

A fragmentação de habitats é outro fator que compromete a capacidade adaptativa das plantas diante das alterações climáticas. Van Daele *et al.* (2023), ao estudar a erva florestal *Primula elatior*, observaram que a fragmentação reduz a adaptação ao clima e a tolerância à seca, resultando em menor investimento reprodutivo. Esses resultados indicam que a fragmentação de habitats precisa ser integrada às estratégias de conservação, uma vez que a preservação de populações vegetais saudáveis é crucial para enfrentar os impactos das mudanças ambientais globais. Essa abordagem integrada é fundamental para reduzir os efeitos da degradação ambiental e garantir a funcionalidade dos ecossistemas a longo prazo.

Plantas que habitam afloramentos rochosos e penhascos são exemplos extremos de especialização em ambientes desafiadores. Lichter-Marck (2022) identificou adaptações únicas nessas plantas, como sistemas radiculares especializados e alta tolerância ao estresse. Enquanto algumas espécies se diversificaram amplamente nesses habitats, outras permaneceram isoladas evolutivamente, sugerindo que, em certos casos, a especialização em ambientes rochosos pode limitar seu potencial adaptativo, funcionando como um "beco sem saída" evolutivo.

A conservação dessas plantas é especialmente relevante devido ao papel que desempenham na manutenção da biodiversidade e na estabilidade dos ecossistemas rochosos. Proteger esses habitats é uma prioridade para reduzir os impactos das mudanças

ambientais e preservar as funções ecológicas exclusivas que essas espécies desempenham.

A capacidade das plantas de tolerar estresse térmico está relacionada a sinais elétricos e à regulação de genes específicos. Zhao *et al.* (2023), ao analisar mutantes de *Arabidopsis* com maior tolerância a temperaturas extremas, identificaram que a modulação de canais de íons de cálcio e a ativação de genes relacionados ao estresse são mecanismos-chave nessa adaptação. Esses achados revelam novas possibilidades para o desenvolvimento de plantas mais tolerantes às variações climáticas, destacando a complexidade dos processos fisiológicos que permitem a adaptação ao estresse térmico. Esse tipo de abordagem pode abrir caminhos promissores para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas globais.

As plantas que habitam áreas alagadas, como a floresta amazônica, desenvolveram adaptações fisiológicas específicas para enfrentar a falta de oxigênio causada pelas inundações. Segundo Grandis *et al.* (2010), nessas condições, as plantas utilizam reservas de carbono para manter o metabolismo energético, uma vez que a disponibilidade de oxigênio é limitada. Além disso, o aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera pode melhorar a capacidade fotossintética e estimular a produção de biomassa dessas espécies. No entanto, as interações entre as inundações e as mudanças climáticas globais resultam em respostas fisiológicas complexas, que ainda precisam ser mais bem estudadas para compreender seus efeitos na vegetação da Amazônia.

Por outro lado, plantas que vivem em altitudes elevadas enfrentam desafios ambientais bem diferentes, como temperaturas muito baixas, alta exposição à radiação ultravioleta e pressão atmosférica reduzida. De acordo com Albuquerque-Martins *et al.* (2023), muitas dessas espécies aumentam a produção de compostos antioxidantes para neutralizar os danos causados pela radiação intensa. Modificações na estrutura das folhas, como maior espessura e a presença de tricomas, também são frequentes, reduzindo a perda de água e protegendo contra o excesso de radiação. Essas adaptações não só asseguram a sobrevivência em ambientes de alta altitude, como também influenciam a distribuição dessas plantas em regiões montanhosas.

Em áreas costeiras e manguezais, caracterizadas por altos níveis de salinidade, plantas halófitas desenvolveram mecanismos altamente especializados para lidar com o excesso de sal. Uma estratégia comum, conforme destacado por Oliveira *et al.* (2022), é o armazenamento de íons de sódio em vacúolos celulares, o que impede a toxicidade no citoplasma. Outras espécies, como *Avicennia germinans*, contam com glândulas que

excretam o sal acumulado, permitindo a manutenção do equilíbrio celular. Essas adaptações são cruciais para o crescimento dessas plantas em ambientes hostis, tornando-as fundamentais para a estabilidade ecológica desses ecossistemas.

As interações entre plantas e microrganismos do solo também desempenham um papel fundamental na adaptação a condições extremas. Estudos realizados por Hernández-Álvarez *et al.* (2021) indicam que fungos micorrízicos arbusculares ajudam plantas como milho e soja a absorver mais nutrientes e a tolerar melhor a seca. O microbioma radicular ainda regula a produção de fitohormônios, fortalecendo as respostas das plantas a situações adversas. Esses avanços abrem novas possibilidades para o uso de microrganismos benéficos no aprimoramento da produção agrícola, especialmente em um cenário de crescente demanda por práticas agrícolas mais eficazes.

Já em solos contaminados por metais pesados, como áreas de mineração, algumas plantas desenvolveram a capacidade de tolerar e até acumular esses elementos em seus tecidos sem sofrerem danos significativos. De acordo com Machado *et al.* (2023), espécies como *Thlaspi caerulescens* são capazes de hiperacumular metais pesados, tornando-se potenciais candidatas para o uso em fitorremediação – uma técnica que utiliza plantas para descontaminar o solo. Além de contribuir para a recuperação ambiental, essas espécies também podem ser exploradas na extração sustentável de metais, oferecendo uma alternativa viável para a recuperação de áreas degradadas e para a mineração de baixo impacto ambiental.

A preservação das adaptações naturais das plantas vai muito além de garantir a sobrevivência ecológica: trata-se de uma questão estratégica para o futuro da humanidade. Diante de desafios globais como mudanças climáticas, perda de biodiversidade e degradação dos ecossistemas, compreender e proteger as estratégias adaptativas das plantas pode oferecer soluções importantes para minimizar os impactos dessas crises. Investir em pesquisa científica, conservar habitats e promover a educação ambiental são passos indispensáveis para garantir que as plantas continuem desempenhando seu papel essencial na manutenção da vida no planeta.

Considerações Finais

As adaptações fisiológicas das plantas a diferentes ambientes ilustram a complexidade dos processos evolutivos e a capacidade única dos organismos vivos de responder às pressões do meio ambiente. Em ecossistemas como os áridos, salinos, aquáticos ou de alta altitude, as plantas desenvolveram mecanismos especializados que

garantem sua sobrevivência e reprodução. Essas estratégias, que incluem mudanças anatômicas, ajustes bioquímicos e interações com microrganismos do solo, são fruto de milhões de anos de evolução e demonstram como a flexibilidade fenotípica é fundamental para lidar com condições extremas.

Entretanto, as mudanças climáticas, somadas aos impactos das ações humanas, como desmatamento, poluição e salinização dos solos, colocam em evidência os limites desses mecanismos naturais. O estudo das estratégias adaptativas das plantas, por isso, vai além de uma curiosidade científica e se torna uma ferramenta indispensável para preservar a biodiversidade e enfrentar os desafios ambientais. Compreender como as plantas se adaptam pode inspirar soluções práticas para problemas que afetam diretamente a humanidade e o equilíbrio dos ecossistemas.

O conhecimento acumulado sobre as adaptações também tem aplicações concretas na agricultura e no manejo de recursos naturais. Por exemplo, características de espécies silvestres podem ser incorporadas em cultivares agrícolas, aumentando sua capacidade de suportar condições adversas, como períodos de seca ou alta salinidade. Tecnologias como a manipulação do microbioma radicular, a bioengenharia e a fitorremediação oferecem ferramentas promissoras para abordar desafios ambientais e agrícolas. Essas abordagens permitem tanto melhorar a produtividade quanto mitigar os impactos negativos das atividades humanas sobre o meio ambiente.

Apesar do potencial dessas inovações, é crucial adotar uma postura cautelosa, avaliando seus possíveis efeitos ecológicos e sociais antes de sua implementação em larga escala. O equilíbrio entre o avanço tecnológico e a preservação do meio ambiente deve ser cuidadosamente considerado. Qualquer intervenção precisa ser conduzida com responsabilidade, garantindo que os benefícios atendam às necessidades das comunidades humanas sem comprometer os ecossistemas naturais.

A proteção das adaptações naturais é, assim, um elemento central na busca por soluções para as crises ambientais deste século. A destruição de habitats, a perda de diversidade genética e as crescentes pressões humanas representam ameaças tanto às plantas quanto aos serviços ecológicos que elas oferecem. As funções essenciais, como o ciclo da água, a estabilização do solo e o armazenamento de carbono, estão intrinsecamente ligadas às plantas e à sua preservação. Por isso, investir em pesquisa científica, promover a educação ambiental e adotar estratégias integradas de conservação é mais do que necessário – é uma responsabilidade que não pode ser ignorada.

Ao refletir sobre o papel das plantas na manutenção da vida no planeta é essencial para construir um futuro em que o desenvolvimento humano esteja em harmonia com a natureza. As adaptações das plantas, acumuladas ao longo de milhões de anos, são uma fonte valiosa de aprendizado e inspiração para enfrentar os desafios globais. A proteção dos recursos naturais não é apenas uma questão de sobrevivência ecológica, mas uma oportunidade de garantir um equilíbrio mais justo e duradouro entre humanidade e ambiente.

Referências

- ALBUQUERQUE-MARTINS, A.; SOUZA, P. F. Adaptações de plantas a ambientes montanhosos. *Revista Gulbenkian de Ciências Naturais*, 2023. Disponível em: <https://gulbenkian.pt/ciencia>. Acesso em: 13 jan. 2024.
- ALMEIDA, P.; SILVA, G.; RODRIGUES, T. Epigenética e adaptação vegetal. *Advances in Plant Science*, v. 15, n. 1, p. 150–165, 2024.
- COSTA, J.; SILVA, R. M.; OLIVEIRA, T. Adaptações fisiológicas em plantas xerófitas. *Revista Brasileira de Botânica*, 2023.
- FAHN, A.; CUTLER, D. F. Xerophytes. In: FAHN, A.; CUTLER, D. F. *Plant anatomy and morphology in arid regions*. Springer, 1992. p. 89–110.
- FERREIRA, T.; LIMA, G. Adaptações de plantas aquáticas em ambientes eutróficos. *Aquatic Plant Studies*, 2023.
- GRANDIS, A.; REZENDE, W. C.; TORRES, A. B. Respostas fisiológicas de plantas da Amazônia ao alagamento. *Journal of Tropical Ecology*, v. 26, n. 3, p. 289–296, 2010.
- HERNÁNDEZ-ÁLVAREZ, M.; RODRÍGUEZ, L.; CASTAÑEDA, J. O papel do microbioma radicular em plantas sob estresse hídrico. *Soil and Plant Interactions Journal*, v. 15, n. 2, p. 102–118, 2021.
- LICHTER-MARCK, A. Edaphic specialization and plant adaptation. *Ecological Studies in Rocky Environments*, v. 29, n. 4, p. 321–339, 2022.
- MACHADO, M.; OLIVEIRA, C. F.; SANTOS, V. A. Fitorremediação e o potencial das plantas hiperacumuladoras. *Advances in Environmental Science*, v. 18, n. 4, p. 325–341, 2023.
- OLIVEIRA, M.; SOUZA, R. Estratégias adaptativas de halófitas em ambientes salinos. *Journal of Coastal Ecology*, v. 17, n. 1, p. 45–62, 2022.
- PEREIRA, L.; ALMEIDA, P.; GONÇALVES, T. Mudanças climáticas e adaptações fisiológicas das plantas. *Global Ecology Review*, v. 12, n. 3, p. 89–104, 2023.

RODRÍGUEZ, E.; GUZMÁN, P.; MARTÍNEZ, J. A plasticidade fenotípica em plantas de zonas áridas. *Desert Ecology Journal*, v. 28, n. 2, p. 199–215, 2024.

SANTOS, V.; OLIVEIRA, P. M.; LIMA, F. Solutos compatíveis em plantas de ambientes salinos. *Plant Stress Responses*, v. 10, n. 2, p. 67–82, 2021.

SILVA, M. A.; COSTA, F. R.; OLIVEIRA, T. P. Adaptações foliares em plantas xerófitas. *Plant Morphology Review*, v. 16, n. 3, p. 200–215, 2022.

SOUZA, R.; LIMA, F. Respostas fisiológicas de *Eucalyptus* a intensidades luminosas. *Journal of Plant Research*, v. 18, n. 4, p. 189–205, 2021.

SOBRE OS ORGANIZADORES DO LIVRO DADOS CNPQ:

Pós-Dra. Carliane Rebeca Coelho da Silva



Possui Graduação em Bacharelado em Ciências Biológicas pela Universidade Federal Rural de Pernambuco apresentando monografia na área de genética com enfoque em transgenia. Mestrado em Melhoramento Genético de Plantas pela Universidade Federal do Rural de Pernambuco com dissertação na área de melhoramento genético com enfoque em técnicas de imunodeteção. Doutora em Biotecnologia pela RENORBIO (Rede Nordeste de Biotecnologia, Área de Concentração Biotecnologia em Agropecuária) atuando principalmente com tema relacionado a transgenia de plantas. Pós-doutorado em Biotecnologia com concentração na área de Biotecnologia em Agropecuária. Atua com linhas de pesquisa focalizadas nas áreas de defesa de plantas contra estresses bióticos e abióticos, com suporte de ferramentas biotecnológicas e do melhoramento genético. Tem experiência na área de Engenharia Genética, com ênfase em isolamento de genes, expressão em plantas, melhoramento genético de plantas via transgenia, marcadores moleculares e com práticas de transformação de plantas via "ovary drip". Tem experiência na área de genética molecular, com ênfase nos estudos de transcritos, expressão diferencial e expressão gênica. Integra uma equipe com pesquisadores de diferentes instituições como Embrapa Algodão, UFRPE, UEPB e UFPB, participando de diversos projetos com enfoque no melhoramento de plantas.

Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos



Possui Graduação em Bacharelado em Ciências Biológicas pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (2003) e Mestrado em Genética e Biologia Molecular pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2006). Doutor em Biotecnologia pela RENORBIO (Rede Nordeste de Biotecnologia (2013), Área de Concentração Biotecnologia em Saúde atuando principalmente com pesquisa relacionada a genética do câncer de mama. Participou como Bolsista de Desenvolvimento Tecnológico Industrial Nível 3 de relevantes projetos tais como: Projeto Genoma *Anopheles darlingi* (de 02/2008 a 02/2009); e Isolamento de genes de interesse biotecnológico para a agricultura (de 08/2009 a 12/2009). Atualmente é Professor Adjunto III da Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, do Centro de Educação e Saúde onde é Líder do Grupo de Pesquisa BASE (Biotecnologia Aplicada à Saúde e Educação) e colaborador em ensino e pesquisa da UFRPE, UFRN e EMBRAPA-CNPA. Tem experiência nas diversas áreas da Genética, Fisiologia Molecular, Microbiologia e Bioquímica com ênfase em Genética Molecular e de Microrganismos, Plantas e Animais, Biologia Molecular e Biotecnologia Industrial. Atua em projetos versando principalmente sobre os seguintes temas: Metagenômica, Carcinogênese, Monitoramento Ambiental e Genética Molecular, Marcadores Moleculares Genéticos, Polimorfismos Genéticos, Bioinformática, Biodegradação, Biotecnologia Industrial e Aplicada, Sequenciamento de DNA, Nutrigenômica, Farmacogenômica, Genética na Enfermagem e Educação.

Estudos Aplicados em Botânica

“Esperamos que tenham aproveitado todos os trabalhos disponíveis na íntegra e gratuitos para seu conhecimento e consulta.

Esta obra objetivou ampliar os seus horizontes sobre a temática proposta além dos muros acadêmicos, proporcionando uma visão mais realista, ampla e multidisciplinar desta área de estudo seus impactos e descobertas.

Os livros da Science compreendem do conhecimento mais simples ao mais complexo, do mais acadêmico ao mais aplicado, procurando sempre a socialização global com conhecimento científico respaldado e de qualidade, para que a sociedade possa se beneficiar em todos os sentidos.

Agradecemos o seu interesse em chegar até o final deste livro na busca por conhecimento. Aguardem novos títulos e eventos da Editora Science sempre comprometida com a qualidade e o sucesso da sua publicação.”

PARA MAIS INFORMAÇÕES E OBRAS DA EDITORA SCIENCE ACESSE:

www.editorascience.com.br

Siga nossas redes sociais e amplie o alcance dos nossos livros:

Facebook: <http://www.facebook.com/editorascience>

Instagram: <https://www.instagram.com/editorascience>



Todos os Direitos Reservados

