Pesquisas Agronômicas

aspectos gerais e avanços tecnológicos

Volume 3



Organizadores

Nadison Barbosa Santana

Rildson Melo Fontenele

Wissen editora

2026

Pesquisas Agronômicas

aspectos gerais e avanços tecnológicos

Volume 3



Organizadores
Nadison Barbosa Santana
Rildson Melo Fontenele

Wissen editora
2026

Nadison Barbosa Santana
Rildson Melo Fontenele
Organizadores

Pesquisas Agronômicas: aspectos gerais e avanços tecnológicos

Volume 3

Teresina-PI, 2026



©2026 *by* Wissen Editora
Copyright © Wissen Editora
Copyright do texto © 2026 Os autores
Copyright da edição © Wissen Editora
Todos os direitos reservados

Direitos para esta edição cedidos pelos autores à Wissen Editora.

Todo o conteúdo desta obra, inclusive correção ortográfica e gramatical, é de responsabilidade do(s) autor(es). A obra de acesso aberto (Open Access) está protegida por Lei, sob Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial-Sem Derivações 4.0 Internacional, sendo permitido seu *download* e compartilhamento, desde que atribuído o crédito aos autores, sem alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Editores Chefe: Dr. Junielson Soares da Silva
Ma. Neyla Cristiane Rodrigues de Oliveira
Dra. Denise dos Santos Vila Verde
Dra. Adriana de Sousa Lima

Projeto Gráfico e Diagramação: Neyla Cristiane Rodrigues de Oliveira

Imagem da Capa: Canva / Inteligência Artificial

Edição de Arte: Neyla Cristiane Rodrigues de Oliveira

Revisão: Os autores
Os Organizadores

Informações sobre a Editora
Wissen Editora
Homepage: www.editorawissen.com.br
Teresina – Piauí, Brasil
E-mail: wisseneditora@gmail.com

Siga nossas redes sociais:
@wisseneditora



EQUIPE EDITORIAL

Editores-chefes
Dr. Junielson Soares da Silva
Ma. Neyla Cristiane Rodrigues de Oliveira
Dra. Denise dos Santos Vila Verde
Dra. Adriana de Sousa Lima

Equipe de arte e editoração
Ma. Neyla Cristiane Rodrigues de Oliveira
Me. Isaquiel de Moura Ribeiro Azevedo

CONSELHO EDITORIAL
Ciências Agrárias e Multidisciplinar
Dr. Felipe Górski - Secretaria de Educação do Paraná (SEED/PR)
Dra. Patrícia Pato dos Santos - Universidade Anhanguera (Uniderp)
Dr. José Carlos Guimarães Júnior - Governo do Distrito Federal (DF)

Ciências Biológicas e da Saúde
Dra. Francijara Araújo da Silva - Centro Universitário do Norte (Uninorte)
Dra. Rita di Cássia de Oliveira Ângelo - Universidade de Pernambuco (UPE)
Dra. Ana Isabelle de Gois Queiroz - Centro Universitário Ateneu (UniAteneu)

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias
Dr. Allan Douglas Bento da Costa - Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)
Dra. Vania Ribeiro Ferreira - Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC)
Dr. Agmar José de Jesus Silva – Secretaria de Educação do Amazonas (Seduc/AM)

Linguística, Letras e Artes
Dra. Conceição Maria Alves de A. Guisardi - Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
Dr. Danni Conegatti Batista – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

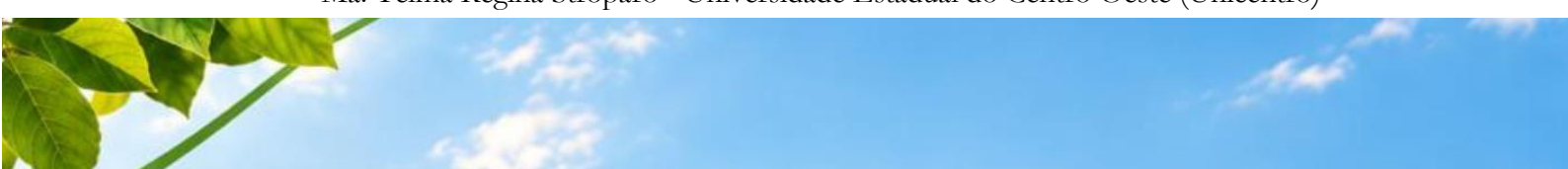
Ciências Humanas e Sociais Aplicadas
Dr. Isael de Jesus Sena - Culture, Education, Formation, Travail (CIRCEFT)
Dra. Mareli Eliane Graupe - Universidade do Planalto Catarinense (Uniplac)
Dr. Rodrigo Avila Colla - Rede Municipal de Ensino de Esteio, RS
Dra. Erika Giacometti Rocha Berribili - Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)
Dr. Douglas Manoel Antonio De Abreu P. Dos Santos - Universidade de São Paulo (USP)
Dra. Aline Luiza de Carvalho - Fundação Hospitalar do Estado de Minas Gerais (FHEMIG)
Dr. José Luiz Esteves - Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC/PR)
Dr. Claudemir Ramos - Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC/SP)
Dra. Daniela Conegatti Batista – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Dr. Wilson de Lima Brito Filho - Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Dra. Cleonice Pereira do Nascimento Bittencourt- Universidade de Brasília (UnB)
Dr. Jonata Ferreira de Moura - Universidade Federal do Maranhão (UFMA)



Dra. Renata dos Santos - Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

Conselho Técnico Científico

Dr. Anderson de Souza Gallo - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)
Dra. Antônia Alikaene de Sá - Universidade Federal do Piauí (UFPI)
Ma. Talita Benedcta Santos Künast - Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Dra. Irene Suelen de Araújo Gomes – Secretaria de Educação do Ceará (Seduc /CE)
Ma. Tamires Oliveira Gomes - Universidade Federal de São Paulo (Unifesp)
Ma. Aline Rocha Rodrigues - União Das Instituições De Serviços, Ensino E Pesquisa LTDA (UNISEPE)
Me. Mauricio Pavone Rodrigues - Universidade Cidade de São Paulo (Unicid)
Esp. Rubens Barbosa Rezende – Faculdade UniFB
Me. Luciano Cabral Rios – Secretaria de Educação do Piauí (Seduc/PI)
Me. Jhenys Maiker Santos - Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Dr. Francisco de Paula S. de Araújo Júnior – Instituto federal da Bahia (IFBA)
Ma. Anna Karla Barros da Trindade - Instituto Federal do Piauí (IFPI)
Dra. Elaine Fernanda dos Santos - Universidade Federal de Sergipe (UFS)
Ma. Lilian Regina Araújo dos Santos - Universidade do Grande Rio (Unigranrio)
Dra. Luziane Said Cometti Lélis - Universidade Federal do Pará (UFPA)
Ma. Márcia Antônia Dias Catunda - Devry Brasil
Ma. Marcia Rebeca de Oliveira - Instituto Federal da Bahia (IFBA)
Ma. Mariana Morais Azevedo - Universidade Federal de Sergipe (UFS)
Dra. Marlova Giuliani Garcia - Instituto Federal Farroupilha (IFFar)
Ma. Rosana Maria dos Santos - Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)
Ma. Rosana Wichineski de Lara de Souza - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
Ma. Simone Ferreira Ângelo - Escola Família Agrícola de Belo Monte - MG
Ma. Suzel Lima da Silva - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
Ma. Tatiana Seixas Machado Carpenter - Escola Parque
Me. Cássio Joaquim Gomes - Instituto Federal de Nova Andradina / Escola E. Manuel Romão
Me. Daniel Ordane da Costa Vale - Secretaria Municipal de Educação de Contagem
Me. Diego dos Santos Verri - Secretária da Educação do Rio Grande do Sul
Me. Fernando Gagno Júnior - SEMED - Guarapari/ES
Me. Grégory Alves Dionor - Universidade do Estado da Bahia (UNEB)/ Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Me. Lucas Pereira Gandra - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); UNOPAR, Polo Coxim/MS
Dr. Lucas Peres Guimarães – Secretaria Municipal de Educação de Barra Mansa - RJ
Dr. Luiz Otávio Rodrigues Mendes - Universidade Estadual de Maringá (UEM)
Me. Mateus de Souza Duarte - Universidade Federal de Sergipe (UFS)
Me. Milton Carvalho de Sousa Júnior - Instituto Federal do Amazonas (IFAM)
Dr. Sebastião Rodrigues Moura - Instituto Federal de Educação do Pará (IFPA)
Dr. Wanderson Diogo A. da Silva - Universidade Estadual do Ceará (UECE)
Ma. Heloisa Fernanda Francisco Batista - Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)
Ma. Telma Regina Stroparo - Universidade Estadual do Centro Oeste (Unicentro)



Dr. Sérgio Saraiva Nazareno dos Anjos - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)



Pesquisas Agronômicas: aspectos gerais e avanços tecnológicos

Volume 3

http://www.doi.org/10.52832/wed.221

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

Pesquisas agronômicas [livro eletrônico]: aspectos gerais e avanços tecnológicos: volume 3 / organização Nadison Barbosa Santana, Rildson Melo Fontenele. -- 3. ed. -- Teresina, PI: Wissen Editora, 2026.
PDF

Vários autores
ISBN 978-65-6219-015-1
DOI 10.52832/wed.221

1. Agricultura 2. Agronomia 3. Ecologia 4. Agricultura e tecnologias relacionadas
I. Santana, Nadison Barbosa. II. Fontenele, Rildson Melo.

26-395416.0 CDD-637.181

Índices para catálogo sistemático:

1. Agricultura: Tecnologia agrícola 637.181

Eliane de Freitas Leite - Bibliotecária - CRB 8/8415

Informações sobre a Wissen Editora
Homepage: www.editorawissen.com.br
Teresina - Piauí, Brasil
E-mail: wisseneditora@gmail.com

Como citar ABNT: SANTANA, Nadison Barbosa; FONTENELE, Rildson Melo. **Pesquisas agronômicas: aspectos gerais e avanços tecnológicos**, v. 3, Teresina-PI: Wissen Editora, 2026. 250 p. DOI: http://www.doi.org/10.52832/wed.221



Teresina-PI, 2026

SOBRE OS ORGANIZADORES



Nadison Barbosa Santana

Engenheiro Agrônomo pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB). Especialista em Docência pelo Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) e em Inovação e Tendências na Educação pelo Instituto Federal Baiano (IF Baiano). Mestrando em Ciências Agrárias pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias (PPGCAG/UFRB).



Rildson Melo Fontenele

Graduado em Zootecnia pela Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA) e em Programa Especial de Formação Pedagógica, com habilitação em Biologia, pela Universidade Estadual do Ceará (UECE). É mestre e doutor em Zootecnia pela Universidade Federal do Ceará (UFC), com trajetória acadêmica e profissional construída nas áreas das Ciências Agrárias, com experiência em Zootecnia, Produção Animal, Produção Vegetal e Ciências Ambientais. Sua atuação em pesquisa contempla temas relacionados à nutrição de ruminantes, exigências nutricionais, aproveitamento de coprodutos da agroindústria, produção animal e vegetal, além de estudos de caráter interdisciplinar envolvendo agricultura, meio ambiente e uso sustentável dos recursos naturais. Esse conjunto de experiências tem ampliado sua atuação em diferentes interfaces das Ciências Agrárias, especialmente na compreensão dos sistemas produtivos e de suas relações com os recursos naturais. Ao longo de sua carreira, exerceu atividades de docência em diferentes instituições e níveis de formação, atuando em cursos das áreas de Agronegócio, Tecnologia de Alimentos, Medicina Veterinária, Agricultura, Meio Ambiente e Saneamento Ambiental. Atualmente, é docente da Faculdade de Tecnologia CENTEC – FATEC Cariri, onde atua nos cursos de Tecnologia em Saneamento Ambiental, Tecnologia em Irrigação e Drenagem e Técnico em Meio Ambiente. Sua trajetória é marcada pela articulação entre ensino, pesquisa e formação tecnológica, com atuação em diferentes campos das Ciências Agrárias e áreas afins. Nesse contexto, sua participação na organização desta obra está alinhada à valorização da pesquisa científica e à disseminação de conhecimentos e avanços tecnológicos voltados à compreensão, ao manejo e ao desenvolvimento sustentável dos sistemas agrícolas.



APRESENTAÇÃO

A agricultura contemporânea é marcada pela necessidade de conciliar produtividade, eficiência no uso dos recursos, inovação tecnológica e sustentabilidade. Nesse cenário, a pesquisa agronômica assume papel fundamental na compreensão dos sistemas de produção e na construção de alternativas capazes de responder aos desafios presentes e futuros do setor agrícola. É nessa perspectiva que se insere o E-Book *Pesquisas Agronômicas: aspectos gerais e avanços tecnológicos*, organizado a partir dos trabalhos apresentados no IV Congresso Nacional de Agronomia On-line.

A obra reúne 21 capítulos que refletem a diversidade e a amplitude da pesquisa em Produção Vegetal, contemplando diferentes culturas, condições edafoclimáticas, abordagens metodológicas e estratégias de manejo. Os estudos abrangem temas relacionados ao solo e à fertilidade, bioinsumos, nutrição e produção vegetal, qualidade de sementes, sanidade e manejo de pragas, resistência e melhoramento genético, além da aplicação de geotecnologias, sensoriamento remoto e agricultura de precisão. Integra-se a esse conjunto a discussão sobre recursos genéticos, biodiversidade e adaptação climática, ampliando a compreensão sobre os caminhos para uma agricultura mais resiliente.

Mais do que reunir resultados de diferentes linhas de pesquisa, este E-Book evidencia a complementaridade entre conhecimentos, métodos e tecnologias que contribuem para o avanço das Ciências Agrárias. Os trabalhos apresentados representam diferentes perspectivas diante de questões relevantes para a produção agrícola e reforçam a importância da pesquisa científica como instrumento de inovação, aperfeiçoamento das práticas produtivas e uso responsável dos recursos naturais.

Espera-se que esta publicação contribua para a disseminação do conhecimento e para o fortalecimento do diálogo entre pesquisadores, profissionais, estudantes e demais interessados nas Ciências Agrárias, estimulando novas pesquisas, reflexões e possibilidades de aplicação em diferentes contextos da agricultura brasileira.

Rildson Melo Fontenele



SUMÁRIO

PARTE I — SOLO, AMBIENTE EDÁFICO E MANEJO DO SOLO 19

ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DE UM PLINTOSSOLO PÉTRICO SOB MATA NATIVA E PASTAGEM NO MARANHÃO 20

Jhoice Ferreira Borges 20

Janderson Moura da Silva 20

Sabrina Hermelindo Ventura 20

João Alves Carvalho 20

Artenisa Cerqueira Rodrigues 20

Ricardo Silva de Sousa 20

Mayanna Karlla Lima Costa 20

Karolayne Ribeiro Caetano 20

Alana Maria de Sousa Martins 20

Julian Junio de Jesús Lacerda 20

DOI: 10.52832/wed.221.1298 20

CAPÍTULO 2 34

SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO E SUAS IMPLICAÇÕES PARA A PRODUÇÃO AGRÍCOLA 34

Mayara Rodrigues Uchôa 34

Nicole Cristina Sousa Santos 34

Eduardo Gabriel Silva Nogueira 34

Leonardo de Almeida Monteiro 34

DOI: 10.52832/wed.221.1299 34

CAPÍTULO 3 45

DINÂMICA DE MACRONUTRIENTES NO PERFIL DO SOLO SOB DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE CORREÇÃO DA ACIDEZ EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO 45

Ronilson Martins Silva 45

Arissa Maeshiro 45

Lucas Rezende Lozano 45

Inara Araújo Mota 45

João Paulo Bernardi Ferreira 45

Marcos Vinicius Proença de Oliveira 45

Fernanda de Fátima Silva Devechio 45



DOI: 10.52832/wed.221.1300 45
PARTE II — FERTILIDADE DO SOLO, BIOINSUMOS E NUTRIÇÃO VEGETAL 56
CAPÍTULO 4 57
POTENCIAL DAS BACTÉRIAS SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO NA REDUÇÃO DA APLICAÇÃO DE INSUMOS MINERAIS FOSFATADOS NA AGRICULTURA 57
Rafaela Felix da França 57
Diogo Paes da Costa 57
Érika Valente de Medeiros 57
Sarah Jane Alexandre Medeiros 57
José Romualdo de Sousa Lima 57
DOI: 10.52832/wed.221.1301 57
CAPÍTULO 5 66
EFICIÊNCIA NUTRICIONAL DE ADUBOS BIOLÓGICOS E MINERAIS PARA A CULTURA DA RÚCULA 66
Fernanda de Fátima da Silva Devechio 66
Beatrice Mourthé Gutierres 66
João Pedro Carneiro De Medeiros 66
Ronilson Martins Silva 66
João Paulo Bernardi Ferreira 66
Jacqueline Regina Ceara Alves Correa 66
Talita Antonia Da Silveira 66
DOI: 10.52832/wed.221.1302 66
CAPÍTULO 6 75
ÍNDICES NUTRICIONAIS DE HÍBRIDOS DE MILHO SOB DIFERENTES NÍVEIS DE ADUBAÇÃO POTÁSSICA A CAMPO 75
Ronilson Martins Silva 75
João Paulo Bernardi Ferreira 75
Arissa Maeshiro 75
Marcos Vinícius Proença de Oliveira 75
Liliane Maria Romualdo Altão 75
Fernanda de Fátima da Silva Devechio 75
DOI: 10.52832/wed.221.1303 75
CAPÍTULO 7 86
MILHO CONVENCIONAL E GENETICAMENTE MODIFICADO: RESPOSTA NUTRICIONAL A NÍVEIS DE NITROGÊNIO, FÓSFORO E POTÁSSIO NO SOLO 86



Ronilson Martins Silva 86
Glaucia Sossai Malvestiti 86
Liliane Maria Romualdo Altão 86
Arissa Maeshiro 86
Otavio Mapeli 86
Inara Araújo Mota 86
Fernanda Aparecida Brandão Rocha 86
Marcos Vinicius Proença de Oliveira 86
Fernanda de Fátima Silva Devechio 86
DOI: 10.52832/wed.221.1304 86
CAPÍTULO 8 97
RESPOSTAS DE TRÊS GENÓTIPOS DE FEIJÃO-FAVA À DEFICIÊNCIA DE NITROGÊNIO NO DESENVOLVIMENTO INICIAL 97
Jhoice Ferreira Borges 97
Janderson Moura da Silva 97
Sabrina Hermelindo Ventura 97
Larissa Macelle de Paulo Barbosa 97
Mayanna Karlla Lima Costa 97
Tailande Novaes de Aquino 97
Janáira Rocha Campos 97
Eudemio Sousa Brito Junior 97
Sandra Mara Barbosa Rocha 97
Julian Junio de Jesús Lacerda 97
DOI: 10.52832/wed.221.1305 97
PARTE III — ESTABELECIMENTO, PRODUÇÃO E MANEJO DAS CULTURAS 107
CAPÍTULO 9 108
AVALIAÇÃO DO VIGOR DE SEMENTES DE LINHAÇA (*LINUM USITATISSIMUM* L.) UTILIZANDO O TESTE DE pH DO EXSUDATO COMO INDICADOR FISIOLÓGICO 108
Mateus Basilio de Oliveira 108
Elaine Gonçalves Rech 108
DOI: 10.52832/wed.221.1306 108
CAPÍTULO 10 117
ESPAÇAMENTO DE PLANTIO E MÉTODOS DE POLINIZAÇÃO NO DESEMPENHO DE ABÓBORA HÍBRIDA TETSUKABUTO EM REGIÃO DE ALTITUDE DA BAHIA. 117



Sabrina Rocha Silva 117
Juliana Araújo da Silva 117
Tainá Ferreira de Sousa 117
Guilherme Cesar de Brito Lordelo 117
Raquel Cardoso Guimarães 117
Luís Vicente Teixeira Lima 117
Henrique Ribeiro Novais 117
Jaime Silva Barboza Neto 117
Hérica França dos Santos 117
Gisele Brito Rodrigues 117
DOI: 10.52832/wed.221.1307 117
CAPÍTULO 11 125
TRATAMENTOS ALTERNATIVOS NO MANEJO DE FUNGOS ASSOCIADOS ÀS SEMENTES DE FEIJÃO CAUPI (*Vigna unguiculata* L.) 125
Samuel Herculano Barros 125
Dean Henrique Alves de Oliveira 125
Philipe Mendes de Andrade 125
Dielândio Silva Monteiro 125
Wanderley Guimarães Gurjão 125
João Anderson Oliveira Nunes 125
Paula Karolynny Souto Leite 125
Razurick Shenia Dos Santos Pessoa 125
Gabriela Barbosa de Freitas Monteiro 125
Robson Eduardo Pereira Monteiro 125
DOI: 10.52832/wed.221.1308 125
CAPÍTULO 12 133
USO DE ÓLEOS ESSENCIAIS NO CONTROLE SUSTENTÁVEL DE INSETOS-PRAGA 133
Bruno Pereira dos Santos 133
Victoria Larco Aguilar 133
Heloize Maia dos Santos 133
Maria Julia Lopes de Souza Sete 133
Yasmin Danielli López Riveros 133
Pedro Henrique Breda Périgo 133



Rosilda Mara Mussury 133
DOI: 10.52832/wed.221.1309 133
CAPÍTULO 13 144
COMPETIÇÃO INTERESPECÍFICA ENTRE FORRAGEIRAS TROPICAIS E GRAMÍNEAS INVASORAS (*Sporobolus indicus* e *Paspalum virgatum*) COMO ESTRATÉGIA DE MANEJO 144
João Paulo Bernardi Ferreira 144
Lucas Barbosa 144
Luiz Guilherme Pessoa Lourenço Bomfiglio 144
Ronilson Martins Silva 144
Inara Araújo Mota 144
Fernanda de Fátima da Silva Devechio 144
Patrícia Andrea Monquero 144
DOI: 10.52832/wed.221.1310 144
PARTE IV — RESISTÊNCIA DE PLANTAS E MANEJO DE INSETOS-PRAGA 156
CAPÍTULO 14 157
RESISTÊNCIA DE GENÓTIPOS DE *Urochloa ruziziensis* A *Deois schach* E *Mahanarva spectabilis* 157
Everton Augusto Francisco Rosa 157
Maria Alice dos Santos Alves 157
Fausto Souza Sobrinho 157
Alexander Machado Auad 157
DOI: 10.52832/wed.221.1311 157
CAPÍTULO 15 164
SELEÇÃO RECORRENTE DO CAPIM-ELEFANTE QUANTO A RESISTÊNCIA À CIGARRINHAS-DAS-PASTAGENS 164
Maria Alice dos Santos Alves 164
Everton Augusto Francisco Rosa 164
Thales Freires Mendonça 164
Juarez Campolina Machado 164
Alexander Machado Auad 164
DOI: 10.52832/wed.221.1312 164
PARTE V — GENÉTICA, MELHORAMENTO E SELEÇÃO DE GENÓTIPOS 173
CAPÍTULO 16 174



EFICIÊNCIA DO USO DE NITROGÊNIO EM PROGÊNIES DE MEIOS-IRMÃOS DE MILHO: PARÂMETROS GENÉTICOS E ANÁLISE MULTIVARIADA PARA SELEÇÃO DE GENÓTIPOS ADAPTADOS AO SEMIÁRIDO 174
Jacilene Francisca Souza Santos 174
Barbara Nascimento Santos 174
Carla Nayara da Silva Lima 174
Nartênia Susane Costa Aragão 174
Carlos Emanuel Brito dos Santos 174
João Pedro da Silva Alves 174
Camila Lima Santos 174
Tâmara Rebecca Aluquerque de Oliveira 174
José Jairo Florentino Cordeiro Junior 174
Gustavo Hugo Ferreira de Oliveira 174
DOI: 10.52832/wed.221.1313 174
CAPÍTULO 17 184
ANÁLISE MULTIVARIADA PARA SELEÇÃO DE PROGÊNIES DE MEIOS-IRMÃOS DE MILHO EM CONDIÇÕES CONTRASTANTES DE DISPONIBILIDADE DE NITROGÊNIO EM REGIÃO SEMIÁRIDA 184
Nartênia Susane Costa Aragão 184
Mikaely Rosendo dos Santos 184
Barbara Nascimento Santos 184
Carla Nayara da Silva Lima 184
Jacilene Francisca Souza Santos 184
Raiane Prissila Andrade da Paixão 184
Carlos Emanuel Brito dos Santos 184
Tâmara Rebecca Albuquerque de Oliveira 184
José Jairo Florentino Cordeiro Junior 184
Gustavo Hugo Ferreira de Oliveira 184
DOI: 10.52832/wed.221.1314 184
PARTE VI — GEOTECNOLOGIAS, MAPEAMENTO E AGRICULTURA DE PRECISÃO 193
CAPÍTULO 18 194
PROJETO DE OBSERVAÇÕES GEODÉSICAS: MAPA DA ÁREA DE FERTILIDADE 194
Germano Oliveira Silvestre 194
Ramiro Tres Lamego e Silva 194



DOI: 10.52832/wed.221.1315 194
CAPÍTULO 19 208
APLICAÇÃO DO GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO NA ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DE HORTALIÇAS 208
Jonathas Ranver da Silva Santos 208
Augusto Yann Cordeiro Freire 208
Marcelo dos Santos de Azevedo 208
Ângelo Gabriel Pereira Silva 208
Alessandro Kayke Pessoa Gama de Sá 208
Henrique Marcos Batista da Gama 208
Heitor Granja Bonfim 208
Érika Victoria Oliveira Bonfim 208
Jocilânia Gomes de Caldas 208
Evelyn Auane de Oliveira Castro 208
DOI: 10.52832/wed.221.1316 208
CAPÍTULO 20 221
ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NO MONITORAMENTO DA PRODUTIVIDADE DO MILHO EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE NITROGÊNIO NO SEMIÁRIDO SERGIPANO 221
Barbara Nascimento Santos 221
Jacilene Francisca Souza Santos 221
Nartênia Susane Costa Aragão 221
Carla Nayara da Silva Lima 221
Mikaely Rosendo dos Santos 221
Carlos Emanuel Brito dos Santos 221
José Felipe Dantas Lima 221
Tâmara Rebecca Albuquerque de Oliveira 221
José Jairo Florentino Cordeiro Junior 221
Gustavo Hugo Ferreira de Oliveira 221
DOI: 10.52832/wed.221.1317 221
CAPÍTULO 21 230
SENSORIAMENTO REMOTO NA AGRICULTURA DE PRECISÃO: AVANÇOS TECNOLÓGICOS, APLICAÇÕES E INTEGRAÇÃO COM MACHINE LEARNING 230
Rodes Ângelo Batista da Silva 230
DOI: 10.52832/wed.221.1318 230



PARTE VII — RECURSOS GENÉTICOS, BIODIVERSIDADE E ADAPTAÇÃO CLIMÁTICA 240
CAPÍTULO 22 241
RECURSOS GENÉTICOS DO CACAUEIRO E ADAPTAÇÃO CLIMÁTICA: O PAPEL ESTRATÉGICO DO BANCO ATIVO DE GERMOPLASMA DA CEPLAC NA CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE AGRÍCOLA 241
Andrielle Leal da Silva 241
Loarena Leal Cruz 241
DOI: 10.52832/wed.221.1319 241



PARTE I — SOLO, AMBIENTE EDÁFICO E MANEJO DO SOLO

CAPÍTULO 1

ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DE UM PLINTOSSOLO PÉTRICO SOB MATA NATIVA E PASTAGEM NO MARANHÃO

Jhoice Ferreira Borges
Universidade Federal do Piauí, Piauí, Brasil

Janderson Moura da Silva
Universidade Federal do Piauí, Piauí, Brasil

Sabrina Hermelindo Ventura
Universidade Federal do Piauí, Piauí, Brasil

João Alves Carvalho
Universidade Federal do Piauí, Piauí, Brasil

Artenisa Cerqueira Rodrigues
Universidade Federal do Piauí, Piauí, Brasil

Ricardo Silva de Sousa
Universidade Federal do Piauí, Piauí, Brasil

Mayanna Karlla Lima Costa
Universidade Federal do Piauí, Piauí, Brasil

Karolayne Ribeiro Caetano
Universidade Federal do Piauí, Piauí, Brasil

Alana Maria de Sousa Martins
Instituto Federal do Piauí, Piauí, Brasil

Julian Junio de Jesús Lacerda
Universidade Federal do Piauí, Piauí, Brasil

DOI: 10.52832/wed.221.1298

Resumo: Os diferentes usos da terra podem influenciar a qualidade dos Plintossolos Pétricos, solos que apresentam limitações físicas naturais e elevada vulnerabilidade. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar atributos físicos, químicos e biológicos de um Plintossolo Pétrico sob mata nativa e pastagem no município de Matões-MA. Foram analisados a cobertura vegetal por meio do NDVI, a declividade, além de atributos físicos (textura, densidade, porosidade e resistência à penetração), químicos e biológicos [(CBM, COT, respiração basal do solo (RBS), atividades enzimáticas, quociente metabólico (qCO_2) e quociente microbiano (Qmic)]. A área de pastagem apresentou elevada densidade do solo (2,02 g cm^{-3}), baixa porosidade total (29,9–31,8%) e resistência à penetração crítica (>14 MPa). Quimicamente, o solo com pastagem apresentou menores teores de fósforo (130,8 para 13,6 mg dm^{-3}), cálcio, magnésio e matéria orgânica (35,4 para 13,5 g kg^{-1}) em comparação ao de mata nativa. Biologicamente, o CBM, COT, Qmic e a atividade da fosfatase ácida e desidrogenase foram menores na pastagem, enquanto a RBS e o quociente metabólico (qCO_2) foram maiores em relação à mata nativa, indicando estresse microbiano. As áreas apresentaram diferenças expressivas nos atributos do solo, reforçando a necessidade de manejo conservacionista e planejamento adequado do uso da terra.

Palavras-chave: Degradação do solo. Manejo conservacionista. Pastejo extensivo. Serviços ecossistêmicos.

1 INTRODUÇÃO

A conversão de ecossistemas naturais em pastagens representa uma das principais formas de uso da terra em regiões tropicais, sendo frequentemente associada a alterações na qualidade do solo. No entanto, a magnitude e a direção dessas mudanças não são uniformes, variando conforme o manejo adotado e as características do solo. Estudos recentes indicam que pastagens degradadas tendem a apresentar redução nos estoques de carbono, compactação e perda de matéria orgânica, enquanto sistemas manejados de forma adequada podem preservar ou promover o acúmulo de carbono no solo (Bento *et al.*, 2025; Mora-Motta *et al.*, 2025).

A degradação em pastagens está geralmente associada à redução da cobertura vegetal, ao pisoteio animal e à ausência de práticas de manejo, resultando em limitações físicas que comprometem funções essenciais do solo, como infiltração de água, crescimento radicular e ciclagem de nutrientes, sendo mais intensas em solos com restrições estruturais (Brasil *et al.*, 2026).

Como consequência, essas alterações também afetam a microbiota do solo, uma vez que a redução da matéria orgânica e as limitações físicas interferem diretamente na atividade microbiana. Em áreas de pastagem, essas alterações promovem redução da biomassa microbiana e atividade enzimática, enquanto ocorre um aumento da respiração basal e do quociente metabólico (qCO_2), indicando maior estresse microbiano e menor eficiência no uso do carbono (Muñoz-Rojas *et al.*, 2018; Muchalak *et al.*, 2025).

Nesse contexto, atributos físicos, químicos e biológicos têm sido bastante utilizados como indicadores da qualidade do solo, permitindo avaliar diferenças no funcionamento do sistema

edáfico sob distintos usos da terra (Bünemann *et al.*, 2018; Cherubin *et al.*, 2016), permitindo identificar alterações simultâneas nos diferentes componentes do sistema edáfico. Apesar dos avanços nesta perspectiva, ainda são limitados os estudos que avaliam esses processos em Plintossolos Pétricos, solos caracterizados por restrições físicas, baixa profundidade efetiva e elevada vulnerabilidade à degradação, associadas à presença de horizontes plínticos ou petroplínticos que limitam a infiltração de água e o crescimento radicular (Garcia *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2020).

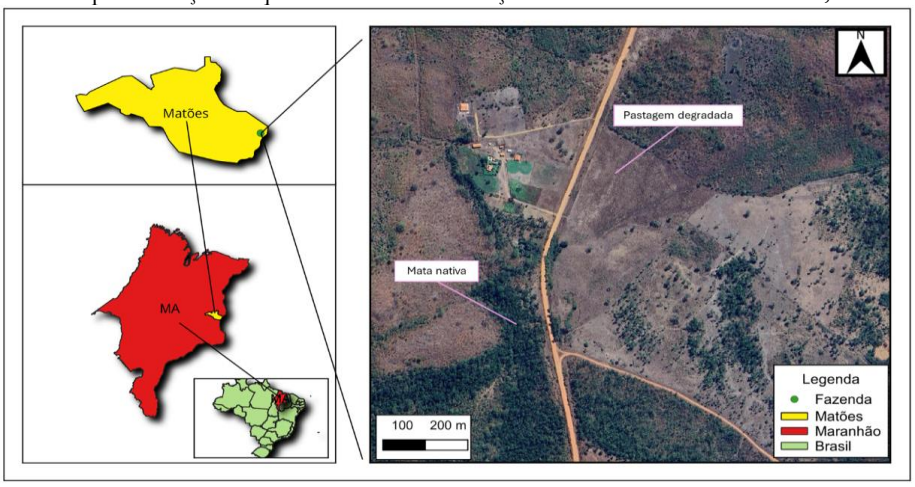
Diante dessas limitações, torna-se necessário compreender como os diferentes usos da terra afetam a qualidade desses solos. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar atributos físicos, químicos e biológicos de um Plintossolo Pétrico sob mata nativa e pastagem no município de Matões-MA, partindo da hipótese de que áreas sob diferentes usos da terra apresentam diferenças nos atributos relacionados à qualidade do solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição geral da área

O estudo foi realizado na Fazenda Santa Tereza, localizada no município de Matões, Maranhão, Brasil (5° 28' 48.5" S; 43° 00' 00.5" W) (Figura 1).

Figura 1 - Representação esquemática da localização da Fazenda Santa Tereza, Matões-MA.



Fonte: Autores, 2026.

Foram avaliadas duas áreas adjacentes sob diferentes usos da terra: uma área sob vegetação nativa e outra sob pastagem. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical (AW'), caracterizado como subúmido seco, com precipitação média anual de 1.020 mm e temperatura média anual de 27,3 °C. Em geral, a região apresenta solos classificados como um Plintossolo Pétrico (IBGE, 2001).

2.2 Avaliação da cobertura vegetal e declividade da área de pastagem

A cobertura vegetal e a declividade foram avaliadas exclusivamente na área sob pastagem, com o objetivo de caracterizar as condições ambientais associadas à susceptibilidade à erosão e às limitações físicas observadas em campo. Para verificar o nível de cobertura do solo da área de pastagem, foi realizada uma análise do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

Também foi analisado o perfil de distribuição da declividade no terreno, parâmetro muito importante para se avaliar a susceptibilidade do solo à erosão. Ambas as análises foram feitas utilizando o software livre e de código aberto para Sistema de Informações Geográficas (QGIS), utilizando as coordenadas geográficas coletadas na área e imagens do satélite Landsat 9.

2.3 Avaliação dos parâmetros físicos, químicos e biológicos do solo

2.3.1 Parâmetros Físicos

A textura do solo foi determinada conforme a metodologia de Teixeira *et al.* (2017). As avaliações físicas relacionadas à resistência à penetração, porosidade e densidade do solo foram realizadas exclusivamente na área sob pastagem, com o objetivo de caracterizar suas condições físicas e identificar possíveis limitações estruturais associadas ao uso atual do solo.

Para a avaliação da resistência à penetração do solo, utilizou-se um penetrômetro de impacto, conforme descrito por Stolf *et al.* (2014). A primeira leitura foi registrada como batida-zero e, em seguida, foram aplicadas dez batidas sucessivas, registrando-se a profundidade alcançada após cada impacto. Após a coleta dos dados de campo, os resultados foram inseridos em uma planilha eletrônica para determinação da resistência à penetração do solo.

A porosidade total (Pt) foi determinada pelo método direto, que consiste em quantificar a massa de água necessária para saturar uma amostra de solo com volume conhecido (100 cm^3). A microporosidade (Mi) foi obtida por meio do método da mesa de tensão: as amostras indeformadas foram previamente saturadas, submetidas a uma tensão de 0,60 m de coluna de água (6 kPa) e posteriormente pesadas após atingirem o equilíbrio. A macroporosidade (Ma) foi calculada pela diferença entre Pt e Mi. A densidade do solo (Ds) foi determinada pela razão entre a massa de solo seco e o volume da amostra, conforme metodologias descritas por Teixeira *et al.* (2017).

2.3.2 Parâmetros Químicos

As análises químicas foram realizadas no Laboratório de Análise de Solos - LAS da Universidade Federal do Piauí, campus Professora Cinobelina Elvas (UFPI/CPCE). Em cada uma das áreas estudadas, foram coletadas 10 amostras simples em zigue-zague, na camada de 0–20 cm. Em seguida, essas amostras foram misturadas e homogeneizadas em um balde, resultando em uma

amostra composta representativa de cada área. As amostras foram colocadas para secar e passadas em peneira com malha de 2,0 mm.

O pH foi determinado em uma mistura de solo: água na proporção de 1:2,5. O fósforo (P), potássio (K), cobre (Cu), ferro (Fe), zinco (Zn) e manganês (Mn) foram extraídos com Mehlich I. O cálcio (Ca) e o magnésio (Mg) foram extraídos com KCl e analisados em espectrofotômetro de absorção atômica. O alumínio (Al) foi extraído com KCl e titulado com hidróxido de sódio, enquanto a acidez potencial (H+Al) foi extraída com solução de acetato de cálcio e titulada com hidróxido de sódio a 0,025 mol L^{-1}. A determinação do teor de matéria orgânica do solo (MO) foi realizada pelo método Walkley-Black, utilizando uma solução de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) em meio ácido. Toda a caracterização química do solo foi realizada de acordo com a metodologia de Teixeira *et al.* (2017).

Com base nos resultados das análises químicas, foram determinadas a soma de bases (SB), a capacidade de troca catiônica (CTC) e a saturação por alumínio (m%). A saturação de bases (V%) foi calculada pela razão entre o somatório das bases e a CTC potencial.

2.3.3 Parâmetros Biológicos

A fração biológica do solo da mata nativa e pastagem foi caracterizada por meio da determinação da biomassa microbiana (CBM), do carbono orgânico total (COT), da respiração basal do solo (RBS) e da atividade de enzimas indicadoras de processos bioquímicos associados aos ciclos do nitrogênio, fósforo, carbono e à degradação de compostos orgânicos, incluindo urease, fosfatase ácida e desidrogenase.

A quantificação do CBM foi realizada por meio do método de irradiação-extração de Islam e Weil (1998). O COT foi determinado por meio da oxidação do carbono orgânico por dicromato de potássio (Walkley-Black, 1934). A RBS pela medição diária da liberação de CO_2 sob incubação aeróbica a 25 °C por 7 dias (Alef; Nannipieri, 1995). Além disso, foi calculado o quociente respiratório (qCO_2), obtido pela razão entre a RBS e a CBM de cada amostra, e o quociente microbiano (Qmic), determinado pela proporção entre CBM e COT multiplicada por 100.

A atividade da urease foi mensurada por determinação da amônia liberada após a incubação do solo com solução de ureia por 2 h a 37°C (Kandeler; Gerber, 1988). A quantidade de amônia produzida foi medida por espectrofotometria. A atividade da fosfatase ácida foi avaliada por meio da estimativa colorimétrica do p-nitrofenol, de acordo com Tabatabai e Bremner (1969). A atividade da desidrogenase no solo foi determinada segundo Casida *et al.* (1964).

2.4 Análise dos dados

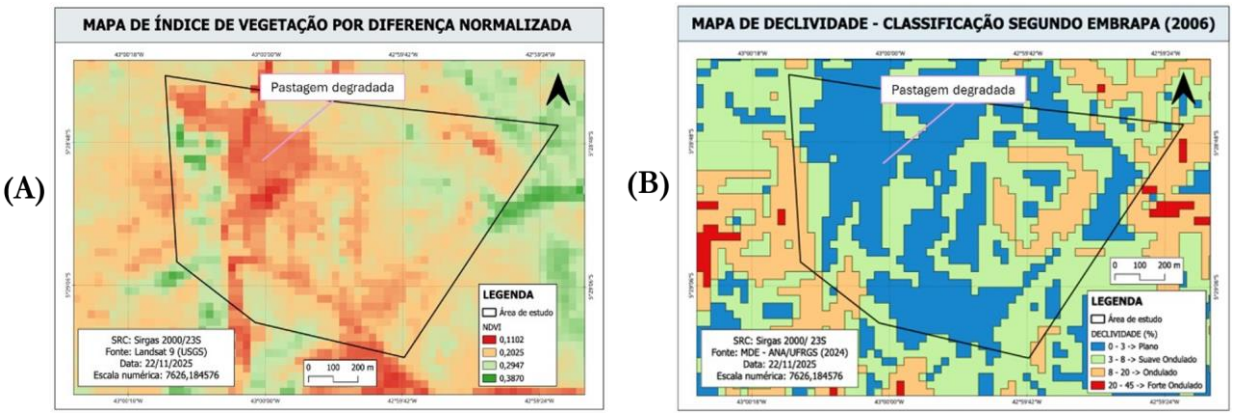
Os dados dos parâmetros biológicos foram analisados e comparados utilizando o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade. A análise dos dados e a confecção das figuras foram realizadas no programa estatístico R (versão 4.4.0), utilizando o pacote ggplot2 para a construção dos gráficos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI e declividade da área

Os baixos valores de NDVI (0,1 a 0,2) observados na área sob pastagem indicam reduzida cobertura vegetal do solo (Figura 2A). Esse padrão indica baixa capacidade de proteção do solo contra impacto direto das chuvas, maior susceptibilidade a erosão e menor aporte de resíduos orgânicos, uma vez que a presença de vegetação é inversamente proporcional à perda de solo pela erosão (Moreira *et al.*, 2025).

Figura 2 - Mapa mostrando o (A) índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e (B) a distribuição da declividade em área de Plintossolo Pétrico sob pastagem, na Fazenda Santa Tereza, em Matões–MA.



Fonte: Autores, 2026.

Em relação ao perfil de declividade (Figura 2B) a área sob pastagem apresenta relevo predominantemente plano a suavemente ondulado, com declividades variando entre 0% e 8%, condição que, em geral, está associada ao baixo risco de erosão. No entanto, observou-se em campo a ocorrência de erosão laminar intensa nesta área, evidenciando a atuação de outros fatores condicionantes. Esse comportamento pode ser explicado pelas características do Plintossolo Pétrico, tipicamente raso e com presença de horizonte endurecido próximo à superfície, o que restringe a infiltração de água e favorece o escoamento superficial (Wang *et al.*, 2020). Além disso, a elevada pedregosidade do terreno contribui para a redução da capacidade de retenção hídrica, aumentando o escoamento superficial e a vulnerabilidade do solo à erosão hídrica (Zhang *et al.*, 2024).

3.3 Parâmetros físicos do solo

3.3.1 Textura do solo

A textura do solo foi classificada como franco-arenosa para o solo de pastagem e franco-argilo-arenosa para o solo de mata nativa, seguindo o triângulo textural disponível no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SIBCS). Dessa forma, é possível observar que a mata nativa possui maior teor de argila (216 g kg^{-1}) e silte (212 g kg^{-1}) em relação à área de pastagem, enquanto a pastagem apresenta predomínio de areia (684 g kg^{-1}) (Tabela 2). Essa característica do solo sob pastagem pode contribuir para aumentar a susceptibilidade à degradação estrutural e diminuir a estabilidade física do solo (Yost; Hartemink, 2019).

3.3.2 Grau de resistência à penetração, porosidade e densidade do solo

Em relação aos dados que demonstram a resistência do solo à penetração e capacidade de resistência a erosão na área de pastagem foi possível observar que a macroporosidade é baixa em ambas as profundidades, com valores de 8,7% na camada superficial e 6,9% entre 20-30 cm, indicando limitação na aeração e no movimento da água no solo (Tabela 1). De forma contrária, a microporosidade é elevada em todo o perfil (>91%), destacando a predominância de poros pequenos, que retêm água, mas oferecem pouca contribuição para a infiltração e drenagem (Lima *et al.*, 2022).

Tabela 1 - Análise da porosidade e densidade do solo coletado nas camadas de 0-10 e 20-30 cm em área de Plintossolo Pétrico sob pastagem, na Fazenda Santa Tereza, em Matões–MA.

Profundidade (cm)	Ma	Mi	Pt	Ds (g cm^{-3})
	----------%----------			
0-10	8,7	91,3	29,9	2,02
20-30	6,9	93,1	31,8	1,86

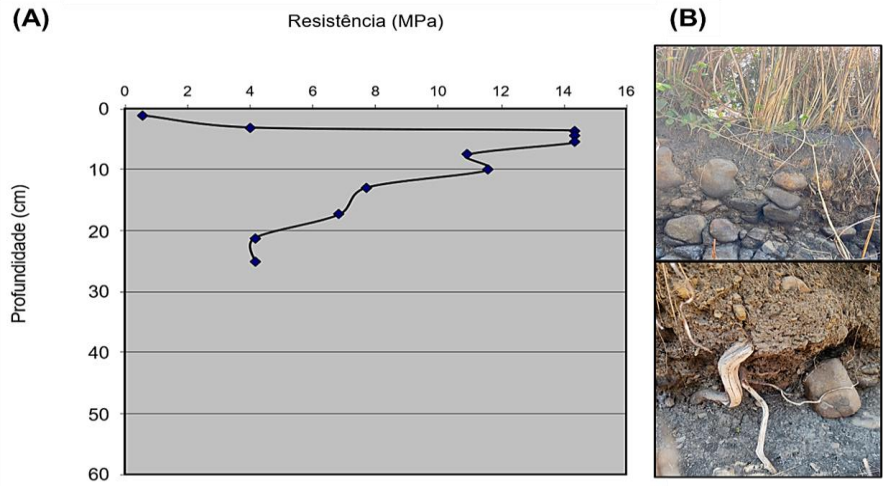
Ma - macroporosidade; Mi - microporosidade; Pt - porosidade total; Ds - densidade do solo.
Fonte: Autores, 2026.

A porosidade total varia de 29,9% na camada mais superficial para 31,8% na camada subsuperficial, valores considerados reduzidos para um solo com estrutura funcional (FAO, 2023). Essa baixa Pt está associada às altas densidades do solo, especialmente nos primeiros 10 cm, em que a Ds atinge 2,02 g cm^{-3}. Mesmo em 20-30 cm, a Ds permanece elevada (1,86 g cm^{-3}), reforçando a presença de compactação ao longo do perfil.

A combinação de baixa macroporosidade, alta densidade e predominância de microporos comprova que o ambiente físico do solo de pastagem é desfavorável e apresenta forte restrição à difusão de gases, infiltração de água e crescimento radicular (Liu; Zhu; Chen, 2025).

A avaliação da resistência à penetração evidência ainda mais os resultados anteriores, confirmando a presença de compactação tanto na superfície quanto em subsuperfície. Na camada de 0 a 5 cm, a resistência à penetração atingiu valores próximos de 14 MPa (Figura 3A). Considerando que a maioria das culturas começa a apresentar restrição significativa já a partir de 1,5 a 3 MPa (Van-Lier *et al.*, 2016; Paiva-Filho *et al.*, 2024), fica claro que a superfície do solo se encontra em condição altamente limitante ao crescimento radicular, como observado na Figura 3B.

Figura 3 - (A) Grau de resistência à penetração do solo; (B) Avaliação visual do crescimento radicular em área de Plintossolo Pétrico sob pastagem, na Fazenda Santa Tereza, em Matões–MA.



Fonte: arquivo pessoal de Jhoice F. Borges (2025).

3.4 Parâmetros químicos do solo

Os resultados das análises para determinação dos atributos químicos e granulométricos dos solos de mata nativa e pastagem estudados estão apresentados na Tabela 2. Foram observados resultados bem contrastantes entre os solos das duas áreas. O solo da pastagem apresentou um pH mais ácido (5,44) em comparação ao solo de mata nativa (5,98), o que aumenta o risco de toxicidade por Al e contribui para menor disponibilidade de nutrientes (Ofoe *et al.*, 2023).

Essa diferença no pH está diretamente associada à menor soma de bases (2,86 cmolc dm^{-3}) na pastagem, decorrente dos baixos teores de Ca (1,4 cmolc dm^{-3}) e Mg (1,17 cmolc dm^{-3}). Em contraste, o solo sob mata nativa apresentou elevada soma de bases (25,8 cmolc dm^{-3}), sustentada principalmente pelos maiores teores de Ca (18,8 cmolc dm^{-3}) e Mg (6,88 cmolc dm^{-3}), o que contribui para a manutenção de um pH menos ácido.

Tabela 2 - Análise química e granulométrica de um Plintossolo Pétrico coletado na camada de 0-20 cm em área de mata nativa e pastagem da Fazenda Santa Tereza em Matões-MA.

Área	Prof. (cm)	pH H_2O	H+Al	Al	Ca	Mg	K	SB	T	P	K	S
			----------cmol$_c$ dm^{-3}----------							-------mg dm^{-3}--------		
Mata nativa	0-20	5,98	7,48	0	18,8	6,88	0,12	25,8	33,26	130,8	45	-
Pastagem	0-20	5,44	2,55	0,5	1,4	1,17	0,28	2,86	5,41	13,6	110	-
			Micronutrientes									
Área	Prof. (cm)	Cu	Mn	Fe	Zn	V%	m%	M.O	C.O	Argila	Silte	Areia
		----------mg dm^{-3}----------								-------mg dm^{-3}--------		
Mata nativa	0-20	4,14	236,8	363	13,88	77,5	0	35,41	-	216	212	572
Pastagem	0-20	0,66	15,7	1013	1,13	52,9	14,9	13,54	-	102	214	684

P, K, Cu, Mn, Fe e Zn - Extrator Mehlich 1; Ca, Mg e Al - Extrator KCl - 1 mol/L; H + Al - Extrator Acetato de Cálcio em pH 7,0; SB = Soma de Bases Trocáveis; CTC (T) = Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; MO - Método Walkley-Black; V% = Índice de Saturação por Bases; m = Índice de Saturação por Alumínio.

Fonte: Autores, 2026.

A saturação por bases (V%) reforçou ainda mais essa diferença entre as duas áreas, atingindo 77,5% na mata nativa e 52,9% na pastagem. Além disso, o alumínio trocável foi ausente na mata nativa, enquanto na pastagem foi de 0,5 cmolc dm^{-3}, o que contribuiu para uma saturação por Al (m%) de 14,9%, indicando risco de toxicidade radicular.

A disponibilidade de fósforo destacou-se na mata nativa com 130,8 mg dm^{-3}, valor muito superior ao da pastagem (13,6 mg dm^{-3}). Isso pode ser explicado pelo alto teor de ferro no solo de pastagem (1.013 mg dm^{-3}), pois em solos ácidos e ricos em ferro, o fósforo reage com óxidos e hidróxidos de ferro, formando compostos insolúveis (como $FePO_4$), o que reduz drasticamente a fração de fósforo disponível para as plantas (Yang *et al.*, 2024). Além disso, o excesso de Fe pode exercer antagonismo sobre outros micronutrientes, contribuindo para as baixas concentrações de Cu e Zn (0,66 e 1,13 mg dm^{-3}, respectivamente) observadas na área de pastagem.

A matéria orgânica apresentou forte contraste entre as duas áreas, alcançando 35,41 g kg^{-1} na mata nativa e apenas 13,54 g kg^{-1} na pastagem. Essas diferenças podem estar associadas tanto às características do uso da terra quanto às propriedades intrínsecas do solo.

Áreas sob manejo inadequado tendem a apresentar redução nos estoques de carbono e matéria orgânica em decorrência da menor deposição de resíduos vegetais e das limitações físicas do solo, como a compactação, que restringe a incorporação e a estabilização da matéria orgânica (Vasconcelos *et al.*, 2025; Oliveira *et al.*, 2022). Além disso, a maior proporção de areia observada

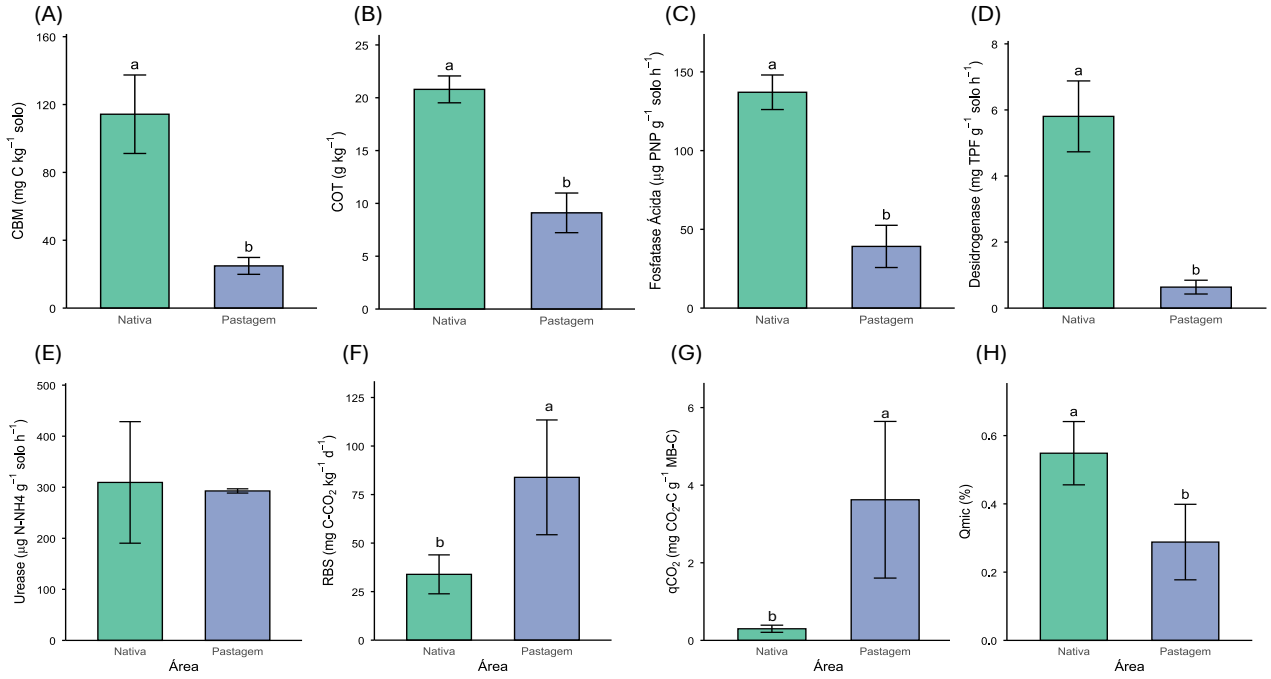
na área sob pastagem também pode ter contribuído para os menores teores de matéria orgânica, uma vez que solos mais arenosos geralmente apresentam menor capacidade de retenção de água, nutrientes e compostos orgânicos (Yost; Hartemink, 2019).

4.5 Parâmetros biológicas do solo

Os microrganismos têm papel essencial na decomposição da matéria orgânica e no funcionamento geral do solo, podendo refletir alterações ambientais por meio de suas características e dinâmicas. Por isso, atributos microbianos vêm sendo adotados como indicadores sensíveis de perturbações no ecossistema (Muñoz-Rojas *et al.*, 2016). A comparação entre os diferentes usos do solo revelou diferenças significativas nos atributos biológicos e bioquímicos do solo (Figura 4), mostrando que áreas sob distintos usos da terra apresentam diferentes condições para o desenvolvimento e funcionamento da microbiota do solo.

Observou-se diminuição do CBM e COT na pastagem em relação à mata nativa (Figura 4A e 4B), possivelmente em decorrência da perda de matéria orgânica observada no resultado da análise química do solo (Tabela 2), uma vez que matéria orgânica constitui a principal fonte de carbono (energia) e substrato para os microrganismos do solo e sua redução tende a limitar o crescimento e a atividade microbiana (Che *et al.*, 2020). Além disso, áreas sob vegetação nativa geralmente apresentam maior aporte e diversidade de resíduos vegetais, favorecendo o fornecimento contínuo de compostos orgânicos e a manutenção de ambientes mais estáveis para o desenvolvimento da microbiota do solo (Primo *et al.*, 2024).

Figura 4 - Comparação dos parâmetros biológicos de um Plintossolo Pétrico sob mata nativa e pastagem na Fazenda Santa Tereza, Matões-MA: (A) Carbono da Biomassa Microbiana (CBM); (B) Carbono Orgânico Total (COT); (C) Fosfatase Ácida; (D) Desidrogenase; (E) Urease; (F) Respiração Basal do Solo (RBS); (G) Quociente Respiratório (qCO_2); e (H) Quociente Microbiano (Qmic).



Fonte: Autores, 2026.

De forma consistente, a fração de carbono microbiano em relação ao carbono total (Qmic) foi reduzida na pastagem, indicando menor capacidade da microbiota em converter o carbono disponível em biomassa microbiana (Antisari *et al.*, 2021). As atividades de fosfatase ácida e desidrogenase também foram significativamente menores na área de pastagem, sugerindo menor capacidade de mineralização de nutrientes e menor atividade metabólica microbiana (Mir *et al.*, 2023).

Embora a urease tenha apresentado valores semelhantes entre os usos do solo, a respiração basal (RBS) e o quociente metabólico (qCO_2) foram significativamente maiores na pastagem. Esse resultado pode ser atribuído ao estresse causado pela limitação de nutrientes e pela menor disponibilidade de substratos orgânicos, condições que elevam o qCO_2, aumentam a demanda energética de manutenção celular, reduzem a incorporação de carbono à biomassa e comprometem a eficiência metabólica dos microrganismos (Morales-Londoño *et al.*, 2019; Santiago *et al.*, 2021).

4 CONCLUSÃO

As áreas sob vegetação nativa e sob pastagem apresentaram diferenças expressivas nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, confirmando a nossa hipótese.

Entretanto, considerando as diferenças texturais observadas entre as áreas, os resultados devem ser interpretados como associações entre usos da terra e atributos do solo, não sendo possível atribuir exclusivamente ao manejo todas as alterações identificadas.

Ainda assim, os resultados evidenciam a vulnerabilidade de Plintossolos Pétricos sob uso pecuário extensivo e reforçam a necessidade de adoção de práticas de manejo conservacionista e planejamento adequado do uso da terra para a manutenção da qualidade do solo.

REFERÊNCIAS

ALEF, K.; NANNIPIERI, P. Methods in applied soil microbiology and biochemistry. San Diego: **Academic Press**, 1995.

ANTISARI, L. V. *et al.* Soil biochemical indicators and biological fertility in agricultural soils: a case study from northern Italy. **Minerals**, v. 11, n. 2, p. 219, 2021. https://doi.org/10.3390/min11020219.

BENTO, L. R. *et al.* Moderate pasture intensification enhances soil organic carbon stocks in a degraded Brazilian Ferralsol. **Soil and Tillage Research**, v. 251, p. 106534, 2025. https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106534.

BRASIL, N. M. Q. X. *et al.* Conversion of degraded pasture to cocoa agroforestry in the Brazilian Amazon: improvements in soil physical and biological properties. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 400, p. 110268, 2026. https://doi.org/10.1016/j.agee.2026.110268.

BÜNEMANN, E. K. *et al.* Soil quality – a critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105–125, 2018. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030.

CASIDA JR., L. E.; KLEIN, D. A.; SANTORO, T. Soil dehydrogenase activity. **Soil Science**, v. 98, n. 6, p. 371-376, 1964.

CHE, R. *et al.* Increased litter input significantly changed the total and active microbial communities in degraded grassland soils. **Journal of Soils and Sediments**, v. 20, n. 7, p. 2804-2816, 2020. https://doi.org/10.1007/s11368-020-02619-x.

CHERUBIN, M. R. *et al.* Assessing soil quality in Brazilian sugarcane expansion areas using a minimum dataset of soil properties. **Ecological Indicators**, v. 66, p. 282–293, 2016. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.05.004.

FAO. **Standard operating procedure for soil bulk density**. Rome: FAO, 2023.

GARCIA, C. H. *et al.* Chemical properties and mineralogy of soils with plinthite and petroplinthite in Iranduba (AM), Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 936–946, 2013. https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000400011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Solos 1:5.000.000**. 2001. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/15829-solos.html. Acesso em: 27 abr. 2026.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biology and Fertility of Soils**, v. 27, n. 4, p. 408–416, 1998. https://doi.org/10.1007/s003740050451.

KANDELER, E.; GERBER, H. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium. **Biology and Fertility of Soils**, v. 6, n. 1, p. 68-72, 1988. https://doi.org/10.1007/BF00257924.

LIU, Y.; ZHU, L.; CHEN, C. The mechanisms and optimization strategies of tillage practices affecting soil pore structure. **Geographical Research Bulletin**, v. 4, p. 507-529, 2025. https://doi.org/10.50908/grb.4.0_507.

MIR, Y. H. *et al.* Soil microbial and enzyme activities in different land use systems of the Northwestern Himalayas. **PeerJ**, v. 11, p. e15993, 2023. https://doi.org/10.7717/peerj.15993.

MORALES-LONDOÑO, D. M. *et al.* Are microbial activity and arbuscular mycorrhizal fungal community influenced by regeneration stages? A case study in Southern Brazil coastal Atlantic Rain Forest. **Applied Soil Ecology**, v. 138, p. 94-98, 2019. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.028.

MORA-MOTTA, D. *et al.* Soil quality responses of a tropical Andisol to contrasting land-use systems: insights from multiple indexing approaches. **Science of the Total Environment**, v. 1002, p. 180648, 2025. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180648.

MOREIRA, A. N. H. *et al.* Using geospatial analysis to detect soil loss in pasture in the Brazilian Savanna (Cerrado). **Australian Journal of Crop Science**, v. 19, n. 5, p. 567-576, 2025. https://doi.org/10.21475/ajcs.25.19.05.p324.

MUCHALAK, F. *et al.* Plant-soil microbiome feedback under post-pasture tropical ecotone forest regeneration. **Applied Soil Ecology**, v. 214, p. 106381, 2025. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.106381.

MUÑOZ-ROJAS, M. *et al.* Soil quality indicators to assess functionality of restored soils in degraded semiarid ecosystems. **Restoration Ecology**, v. 24, p. S43-S52, 2016. https://doi.org/10.1111/rec.12368.

MUÑOZ-ROJAS, M. *et al.* Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration. **Current Opinion in Environmental Science & Health,** v. 5, p. 47–52, 2018. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.04.007.

OFOE, R. *et al.* Aluminum in plant: benefits, toxicity and tolerance mechanisms. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1085998, 2023. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1085998.

PRIMO, A. A. *et al.* Different composition of plant residues as a driver of microbial community structure and soil organic matter composition: a microcosm study. **Pedobiologia**, v. 106, p. 150985, 2024. DOI: 10.1016/j.pedobi.2024.150985.

SANTIAGO, T. *et al.* Soil microbial communities respond to an environmental gradient of grazing intensity in South Patagonia, Argentina. **Journal of Arid Environments**, v. 184, p. 104300, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104300.

STOLF, R. *et al.* Penetrômetro de impacto Stolf: programa computacional de dados em EXCEL-VBA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 774-782, 2014. https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000300009.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 1, n. 4, p. 301-307, 1969. https://doi.org/10.1016/0038-0717(69)90012-1.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília: Embrapa, 2017. 577 p.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method. **Soil Science**, v. 47, p. 29-38, 1934.

WANG, X. *et al.* Soil hydraulic properties and water flow characteristics in plinthic soils. **Water**, v. 12, n. 6, p. 1783, 2020. https://doi.org/10.3390/w12061783.

YOST, J.; HARTEMINK, A. E. Soil organic carbon in sandy soils: a review. In: SPARKS, D. L. (ed.). **Advances in Agronomy**. [S.l.]: Academic Press, 2019. v. 158, p. 217–310. DOI: 10.1016/bs.agron.2019.07.004.

ZHANG, S. *et al.* Effects of rock outcrops on runoff and erosion from karst slopes under simulated rainfall. **Land Degradation & Development**, v. 35, n. 3, p. 949-967, 2024. https://doi.org/10.1002/ldr.4963.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO E SUAS IMPLICAÇÕES PARA A PRODUÇÃO AGRÍCOLA

Mayara Rodrigues Uchôa
Universidade Federal do Ceará, Ceará, Brasil

Nicole Cristina Sousa Santos
Universidade Federal do Ceará, Ceará, Brasil

Eduardo Gabriel Silva Nogueira
Universidade Federal do Ceará, Ceará, Brasil

Leonardo de Almeida Monteiro
Universidade Federal do Ceará, Ceará, Brasil

DOI: 10.52832/wed.221.1299



Resumo: Introdução: o preparo do solo é etapa determinante dos sistemas de produção agrícola, pois condiciona a germinação, o estabelecimento das plântulas e a conservação do solo, sendo fortemente dependente das máquinas e implementos empregados. Objetivo: comparar as características, a mecanização e os efeitos dos sistemas convencional, cultivo mínimo e plantio direto. Metodologia: revisão bibliográfica narrativa de artigos, livros e documentos técnicos publicados entre 2000 e 2023 nas bases SciELO, Scopus e Google Acadêmico e em repositórios da Embrapa, da FAO e do IBGE. Resultados e discussão: o sistema convencional tende a promover maior revolvimento e, conforme as condições edafoclimáticas e o histórico de manejo, pode acentuar erosão e compactação; o cultivo mínimo reduz operações e preserva parte da cobertura vegetal; o sistema plantio direto, fundamentado no não revolvimento, na rotação de culturas e na cobertura permanente por palhada, tem sido associado, na maioria dos trabalhos revisados, à melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo e da produtividade a longo prazo. Conclusões: o sistema plantio direto configura-se como uma das alternativas mais promissoras entre os sistemas conservacionistas, cuja sustentabilidade depende da adoção conjunta de seus três princípios e da adequação às condições edafoclimáticas locais.

Palavras-chave: Conservação do solo. Máquinas agrícolas. Plantio direto. Qualidade física do solo.

1 INTRODUÇÃO

O solo é o principal recurso natural utilizado na agricultura e o seu manejo adequado constitui um dos pilares da produção vegetal. Os sistemas de cultivo correspondem ao conjunto de práticas de manejo associadas a uma determinada espécie vegetal, planejadas para otimizar a produção (Albuquerque *et al.*, 2017). Dentro desse conjunto, o preparo do solo é a manipulação agrícola que visa criar condições adequadas à germinação das sementes, ao estabelecimento das plântulas, ao controle de plantas daninhas e à manutenção da fertilidade e da produtividade.

Conforme o grau de mobilização imposto ao solo, os sistemas de preparo podem ser classificados em convencional, cultivo mínimo e plantio direto (Santiago; Rossetto, 2007). Essa classificação está diretamente relacionada às operações mecanizadas empregadas: enquanto o sistema convencional faz uso intensivo de arados e grades, os sistemas conservacionistas, cultivo mínimo e plantio direto, reduzem o número de operações e priorizam a manutenção da cobertura vegetal sobre o solo.

A mecanização é, portanto, elemento central na diferenciação dos sistemas de preparo. De acordo com a norma EP291.3 da American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE, 2009), os equipamentos de preparo dividem-se em máquinas de preparo primário, que rompem as camadas compactadas e demandam maior potência, como arados de disco e de aiveca, grade aradora e subsolador, e máquinas de preparo secundário, que desfazem os torrões e nivelam o terreno, como cultivadores, grades niveladoras e enxadas rotativas.

No Brasil, a busca por sistemas conservacionistas intensificou-se a partir da década de 1990, motivada pela necessidade de reduzir a erosão, a compactação e a degradação do solo, bem como os

custos de produção (Casão Junior; Araújo; Llanillo, 2012; Denardin *et al.*, 2014). Estudos de longo prazo evidenciam que o revolvimento intensivo do solo afeta negativamente seus atributos físicos e a produtividade quando comparado à semeadura direta (Brown *et al.*, 2018). Diante desse contexto, o objetivo desta revisão foi descrever e comparar as características, a mecanização e os efeitos sobre o solo e a produtividade dos sistemas de preparo convencional, cultivo mínimo e plantio direto.

2 METODOLOGIA

O presente trabalho consiste em uma revisão bibliográfica de caráter narrativo sobre os sistemas de preparo do solo e sua mecanização. As buscas foram realizadas entre janeiro e março de 2024 nas bases de dados científicas SciELO, Scopus e Google Acadêmico, bem como em repositórios institucionais da Embrapa, da Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e de programas de pós-graduação. As estratégias de busca combinaram os descritores, em português e em inglês, unidos pelos operadores booleanos AND e OR: em português, ("preparo do solo" OR "manejo do solo") AND ("plantio direto" OR "cultivo mínimo" OR "preparo convencional") AND ("mecanização agrícola" OR "máquinas agrícolas" OR "conservação do solo"); em inglês, ("soil tillage" OR "soil management") AND ("no-tillage" OR "minimum tillage" OR "conventional tillage") AND ("agricultural mechanization" OR "farm machinery" OR "soil conservation").

Delimitou-se o intervalo de publicação entre 2000 e 2023, período que compreende as principais publicações nacionais e internacionais consolidadas sobre os efeitos dos sistemas de preparo nos atributos do solo, na mecanização e na produtividade das culturas, incluindo os estudos de longa duração pertinentes ao tema. Foram considerados como critérios de inclusão: artigos científicos, livros, capítulos de livros, normas técnicas e documentos institucionais escritos em português, inglês ou espanhol; publicações que abordassem, direta ou indiretamente, o preparo convencional, o cultivo mínimo ou o sistema plantio direto; e trabalhos com ênfase em mecanização, atributos edáficos ou produtividade. Foram excluídos: resumos expandidos e comunicações em anais sem revisão por pares, textos sem descrição metodológica clara e publicações que não abordavam os sistemas de preparo em análise.

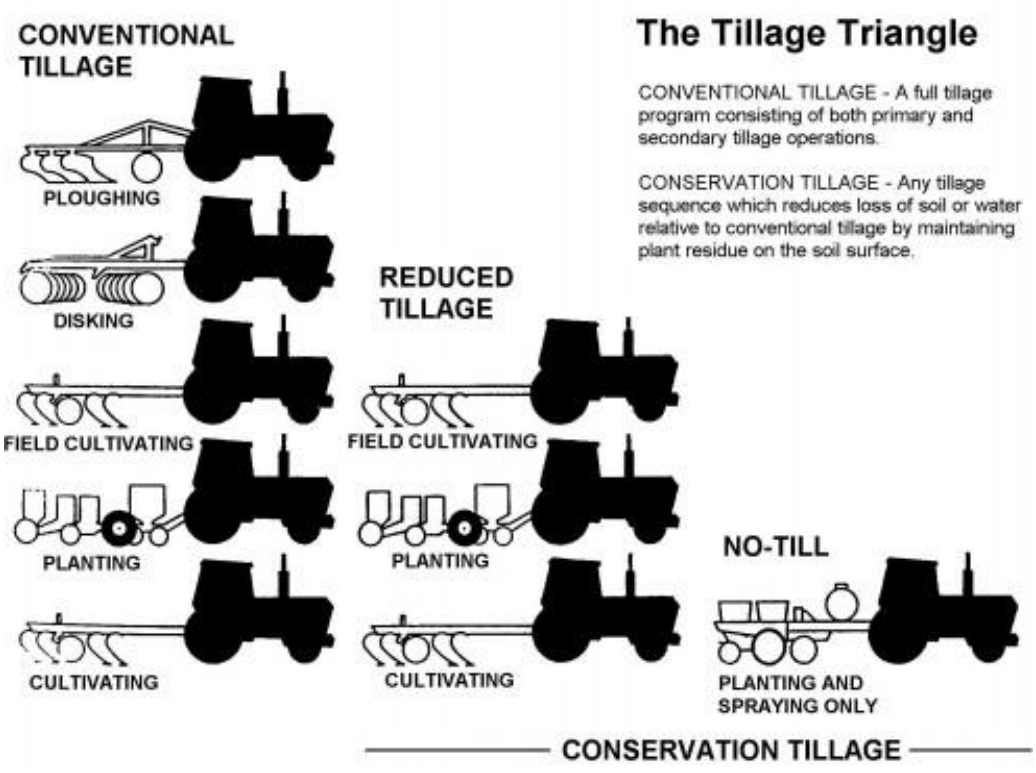
A seleção seguiu quatro etapas: (i) busca inicial nas bases indicadas, com identificação de 187 documentos; (ii) remoção de duplicatas por meio da conferência manual de títulos, autores e ano de publicação em planilha eletrônica, resultando em 156 documentos; (iii) triagem por título e resumo à luz dos critérios de inclusão e exclusão, mantendo-se 62 documentos; e (iv) leitura integral, aplicação dos critérios de elegibilidade e inclusão de 12 referências adicionais localizadas por

rastreamento de citações, totalizando 41 documentos analisados na síntese qualitativa. As informações extraídas foram organizadas em três eixos temáticos, correspondentes aos sistemas convencional, cultivo mínimo e plantio direto, e comparadas com base nos seguintes critérios: (a) grau de mobilização do solo; (b) máquinas e implementos empregados; (c) efeitos sobre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo; (d) efeitos sobre a erosão e a compactação; (e) reflexos sobre a produtividade das culturas; e (f) demanda operacional e consumo de combustível.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os sistemas de preparo do solo diferenciam-se pelo grau de mobilização imposto ao solo e, consequentemente, pela intensidade de mecanização empregada. A seguir, descrevem-se as características, as máquinas utilizadas e os principais efeitos de cada sistema sobre os atributos do solo e a produtividade das culturas.

Figura 1 – Grau de mobilização do solo nos sistemas de preparo, representado pelo triângulo da lavoura (figura reproduzida no idioma original da fonte).



Fonte: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). Manual on integrated soil management and conservation practices. Rome: FAO, 2000. Figura reproduzida no idioma original da publicação para fins de citação acadêmica não comercial, com atribuição integral à fonte.

3.1 Sistema de cultivo convencional

O preparo convencional caracteriza-se pelo revolvimento das camadas superficiais do solo,

com o objetivo de incorporar corretivos e fertilizantes, reduzir a compactação, aumentar a porosidade e elevar a permeabilidade e o armazenamento de ar e água (Santiago; Rossetto, 2007). É realizado em duas etapas: o preparo primário, mais agressivo e profundo, executado com arados ou grades pesadas; e o preparo secundário, de destorroamento e nivelamento, realizado com grades niveladoras imediatamente antes do plantio (ASABE, 2009; EMBRAPA, 2016).

Apesar de amplamente difundido, o preparo convencional pode acarretar impactos negativos ao solo, cuja magnitude não é constante e depende de fatores como textura, umidade no momento das operações, profundidade e frequência das mobilizações, tráfego de máquinas, declividade da área, condições climáticas e histórico de manejo. Nessas condições, o revolvimento repetido, associado à baixa cobertura vegetal, tem sido apontado como um dos principais fatores associados à intensificação da erosão hídrica, à formação de camadas compactadas subsuperficiais e à redução da infiltração de água (Reichert *et al.*, 2016; Denardin *et al.*, 2014). Brown *et al.* (2018), em experimento de longa duração conduzido por vinte anos, observaram que, nas condições avaliadas, o preparo convencional reduziu o rendimento de grãos de soja e milho e aumentou a densidade do solo em relação à semeadura direta, resultados que reforçam a importância de considerar o tempo de adoção e as condições edafoclimáticas locais na avaliação do manejo.

3.1 Sistema de cultivo mínimo

O cultivo mínimo, também referido em parte da literatura como preparo reduzido, é um sistema conservacionista caracterizado pela redução do número de operações de preparo e pela manutenção de resíduos culturais na superfície do solo, adotando-se, com frequência, o parâmetro de pelo menos 30% de cobertura remanescente após a semeadura como referência para caracterização de sistemas conservacionistas (Rossetto; Santiago, 2016; Denardin *et al.,* 2014). O preparo é realizado principalmente com escarificadores e, eventualmente, com grades leves, o que reduz o revolvimento e preserva parcialmente a palhada. Trata-se de uma alternativa útil, sobretudo em situações de transição do preparo convencional para sistemas mais conservacionistas, sendo, contudo, mais recomendada quando o solo não apresenta compactação subsuperficial expressiva, quando as demandas de correção química estão razoavelmente atendidas e quando os problemas de pragas e erosão estão sob controle; nesses casos, e como qualquer sistema, sua efetividade depende do manejo integrado das condições edafoclimáticas locais (Rossetto; Santiago, 2016).

Em comparação ao convencional, o cultivo mínimo viabiliza o plantio antecipado em épocas chuvosas, reduz a erosão e o uso de máquinas, economiza combustível e mão de obra e melhora o controle de plantas daninhas (Strohhaecker; Helmich, 2000). Nesse aspecto, Fernandes, Silveira

e Rinaldi (2008), ao avaliarem o custo energético de diferentes operações agrícolas mecanizadas na semeadura do milho, observaram que o plantio direto proporcionou o menor consumo de combustível, seguido pelo cultivo mínimo com grade leve, pelo preparo reduzido e, por fim, pelo preparo convencional, evidenciando a economia de energia associada aos sistemas conservacionistas. Tavares, Lima e Zonta (2010), estudando a cana planta, verificaram que o cultivo mínimo proporcionou maior diâmetro de colmo e maior acúmulo de matéria orgânica no sistema, evidenciando ganhos produtivos e ambientais.

3.2 Sistema plantio direto

O sistema plantio direto (SPD) define-se pela implantação da cultura diretamente sobre os restos das culturas anteriores, com revolvimento restrito à linha de semeadura. Fundamenta-se em três requisitos: o não revolvimento do solo, a rotação de culturas e a cobertura permanente por palhada (Freitas, 2005). No sistema plantio direto, o revolvimento do solo é restrito principalmente à linha de semeadura, onde semeadoras específicas cortam a palha e depositam sementes e fertilizantes em sulcos estreitos, sem a mobilização generalizada da área. Isso não significa, contudo, que outras máquinas deixem de ser utilizadas no sistema produtivo: pulverizadores, distribuidores de calcário e fertilizantes, colhedoras e, quando necessário, escarificadores para descompactação pontual, integram o conjunto de operações mecanizadas conduzidas ao longo do ciclo agrícola (Peche Filho, 2010; Denardin, 2016; Reichert *et al.*, 2016). Nesse contexto, o tráfego intenso de máquinas em áreas sob plantio direto pode induzir a compactação das camadas superficiais e restringir o desenvolvimento radicular, sobretudo em Latossolos argilosos e em condições de elevada umidade do solo (Moraes *et al.*, 2020); a adoção do controle de tráfego agrícola, com a delimitação de linhas permanentes de circulação das máquinas, tem sido apontada como estratégia complementar para preservar os atributos físicos do solo e reduzir o consumo de combustível (Roque *et al.*, 2010; Reichert *et al.*, 2016). O sistema plantio direto (SPD) foi introduzido no Brasil no início da década de 1970, por iniciativa de produtores pioneiros no estado do Paraná, inicialmente como estratégia de controle da erosão. Sua difusão mais expressiva ocorreu a partir dos anos 1990, quando a prática se expandiu rapidamente pelo Paraná e pelos demais estados produtores. Os primeiros dados oficiais sobre a área cultivada sob o sistema foram levantados pelos Censos Agropecuários do IBGE de 2006 e 2017. Conforme análise desses dados realizada por Fuentes-Llanillo *et al.* (2021), a área sob plantio direto no país passou de 17,9 milhões de hectares, em 2006, para 33,0 milhões de hectares, em 2017, crescimento de aproximadamente 84,4%, o que elevou a participação do sistema de 51,2% para 61,0% da área de lavouras temporárias. Esses números posicionam o Brasil como uma das maiores áreas sob plantio direto do mundo e como referência internacional em agricultura conservacionista. Cabe, contudo,

uma ressalva relevante: com base em estimativas discutidas por Fuentes-Llanillo *et al.* (2021) para as condições brasileiras no período dos Censos Agropecuários de 2006 e 2017, apenas parcela dessa área adotaria integralmente os três princípios que caracterizam o sistema plantio direto em sentido estrito, quais sejam, o não revolvimento do solo, a manutenção permanente da cobertura vegetal e a rotação de culturas. Assim, parcela expressiva do total corresponderia, mais propriamente, à prática de semeadura direta ou de plantio direto isolado, e não ao sistema plantio direto consolidado.

Os benefícios do SPD são amplamente documentados. Costa *et al.* (2003), em estudo de 21 anos, observaram redução da densidade do solo, aumento da estabilidade de agregados e maiores rendimentos de soja e milho no plantio direto. Resultados semelhantes foram relatados por Dalmago *et al.* (2009) quanto à maior retenção de água, e por Nunes *et al.* (2018), que constataram melhores condições físicas, químicas e biológicas e maiores teores de matéria orgânica em áreas sob plantio direto por mais de 20 anos. Franchini *et al.* (2012), avaliando duas décadas de dados no sul do Brasil, evidenciaram que a associação entre plantio direto e rotação de culturas produziu incrementos consistentes de produtividade em relação a sistemas com preparo convencional e monocultura. De modo complementar, Sá *et al.* (2014) documentaram, em Latossolos brasileiros, a recuperação dos estoques de carbono do solo e ganhos em resiliência e produtividade sob adoção prolongada do sistema plantio direto, enquanto Blanco-Canqui e Ruis (2018), em revisão internacional, sistematizaram os efeitos do não revolvimento sobre a estrutura, a densidade, a porosidade e a infiltração de água, destacando que tais benefícios se manifestam de forma progressiva e dependem do tempo de adoção e do manejo integrado dos resíduos culturais. Assim, o sistema plantio direto, quando conduzido de acordo com seus princípios, tem sido associado à manutenção e à melhoria dos atributos do solo e à maior sustentabilidade do sistema produtivo (Denardin *et al.*, 2014; Maia *et al.*, 2022; Gomes Júnior; Barbosa; Melo, 2023).

O quadro 1 sintetiza as principais características que diferenciam os três sistemas de preparo do solo quanto à mobilização, à cobertura, à mecanização e à conservação.

Quadro 1 – Características comparativas dos sistemas de preparo do solo.

Característica	Convencional	Cultivo mínimo	Plantio direto
Mobilização do solo	Intensa	Reduzida	Mínima (linha de semeadura)
Cobertura vegetal	Pouca ou nenhuma	Parcial (≥30%)	Permanente (palhada)
Máquinas principais	Arado e grade	Escarificador	Semeadora-adubadora
Risco de erosão	Alto	Médio	Baixo
Conservação do solo	Baixa	Média	Alta

Nota: as categorias qualitativas (alto, médio, baixo; baixa, média, alta) representam tendências gerais observadas na literatura consultada e não constituem classificações universais, podendo variar em função das condições edafoclimáticas locais, do manejo adotado e do tempo de adoção do sistema.

Fonte: Elaborado pelos autores (2024) a partir de Santiago e Rossetto (2007), Denardin et al. (2014) e Rossetto e Santiago (2016).

A Tabela 1 apresenta a evolução da área e da participação do sistema plantio direto no Brasil entre os Censos Agropecuários de 2006 e 2017.

Tabela 1 – Evolução da área e da participação do sistema plantio direto no Brasil (2006 a 2017).

Ano	Área sob plantio direto (milhões de ha)	Participação nas lavouras temporárias (%)
2006	17,9	51,2
2017	33,0	61,0

Fonte: Elaborado pelos autores a partir de Fuentes-Llanillo *et al.* (2021), que sistematizaram os microdados dos Censos Agropecuários do IBGE de 2006 e 2017.

De modo geral, a literatura converge para a superioridade dos sistemas conservacionistas em relação ao preparo convencional no que tange à conservação do solo e à sustentabilidade da produção. O sistema convencional, embora tenha perdido participação relativa em lavouras temporárias, mantém adoção expressiva em determinadas regiões, culturas e sistemas produtivos brasileiros, em especial em culturas anuais de subsistência e em áreas com menor nível tecnológico, associando-se, em geral, a maior degradação física, a processos erosivos e a custos operacionais decorrentes do uso mais intensivo de máquinas (Brown *et al.*, 2018; Fuentes-Llanillo e*t al.*, 2021). O cultivo mínimo representa uma transição, reduzindo operações e mantendo a cobertura do solo (Tavares; Lima; Zonta, 2010), enquanto o plantio direto reúne os maiores benefícios edáficos e produtivos a longo prazo (Costa *et al.*, 2003; Nunes *et al.*, 2018). Ressalta-se, contudo, que a escolha do sistema deve considerar as condições edafoclimáticas locais, a disponibilidade de mecanização e o nível tecnológico do produtor, não havendo um modelo único aplicável a todas as situações.

4 CONCLUSÃO

A revisão evidenciou que os sistemas de preparo do solo diferenciam-se fundamentalmente pelo grau de mobilização e pela mecanização empregada, com reflexos diretos sobre a conservação do solo e sobre a produtividade das culturas. O sistema convencional, baseado em aração e gradagem, mostrou-se, na maior parte dos estudos analisados, o mais suscetível a processos erosivos e de compactação, embora a magnitude desses efeitos varie conforme textura, umidade, profundidade das operações, tráfego, declividade, clima e histórico de manejo. O cultivo mínimo constitui alternativa intermediária, reduzindo o número de operações e preservando parte da cobertura vegetal. O sistema plantio direto, por sua vez, associou-se, nos trabalhos revisados, à melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo e a maiores rendimentos em avaliações de longa duração, o que ajuda a explicar sua crescente adoção no país. Ressalta-se, todavia, que os benefícios do sistema plantio direto não podem ser tomados como universais: dependem da adoção conjunta de seus três

princípios (não revolvimento, cobertura permanente e rotação de culturas), do controle de tráfego, do tempo de adoção do sistema e das condições locais de solo, clima e cultura. Conclui-se que a adoção de sistemas conservacionistas, sobretudo o sistema plantio direto tecnicamente conduzido, é estratégica para uma agricultura mais sustentável, embora a escolha do manejo mais adequado dependa das condições edafoclimáticas locais e do nível de mecanização disponível. Recomenda-se a continuidade de estudos de longa duração que avaliem a interação entre mecanização, manejo e produtividade em diferentes regiões e culturas.

Agradecimentos e financiamento

Os autores agradecem à Universidade Federal do Ceará (UFC) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA/UFC) pelo apoio institucional, pela infraestrutura de estudos e pela orientação acadêmica que viabilizaram a realização desta revisão. Agradecimentos também à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap), pelo fomento da bolsa de doutorado a primeira autora.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, J. A. A. *et al.* Ocorrência de plantas infestantes após colheita da soja em sistemas rotacionado em plantios direto e convencional no Cerrado de Roraima. **Planta Daninha,** Viçosa, v. 35, e017162796, 2017. DOI: 10.1590/s0100-83582017350100005.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS (ASABE). **Terminology and definitions for soil tillage and soil-tool relationships**. EP291.3. St. Joseph: ASABE, 2009.

BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. No-tillage and soil physical environment. **Geoderma**, Amsterdam, v. 326, p. 164-200, 2018. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.03.011.

BROWN, V.; BARBOSA, F. T.; BERTOL, I.; MAFRA, Á. L.; MUZEKA, L. M. Efeitos no solo e nas culturas após vinte anos de cultivo convencional e semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 13, n. 3, e5545, p. 1-7, 2018. DOI: 10.5039/agraria.v13i3a5545.

CASÃO JUNIOR, R.; ARAÚJO, A. G.; LLANILLO, R. F. **No-till agriculture in southern Brazil: factors that facilitated the evolution of the system and the development of the mechanization of conservation farming**. Londrina: IAPAR, 2012. 77 p.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 527-535, 2003. DOI: 10.1590/S0100-06832003000300015.

DALMAGO, G. A.; BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I.; KRÜGER, C. A. M. B.; COMIRAN, F.;HECKLER, B. M. M. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**,

Campina Grande, v. 13, suppl., p. 855-864, 2009. DOI: 10.1590/S1415-43662009000700007.

DENARDIN, J. E. **Sistema Plantio Direto:** o conceito (SPD). Brasília: Embrapa, Agência Embrapa de Informação Tecnológica (AGEITEC), 2016. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/sistemaplantiodireto. Acesso em: 3 mai. 2024.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; FAGANELLO, A.; COGO, N. P. **Agricultura conservacionista no Brasil:** uma análise do conceito à adoção. *In:* LEITE, L. F. C.; MACIEL, G. A.; ARAÚJO, A. S. F. (org.). Agricultura conservacionista no Brasil. Brasília: Embrapa, 2014. p. 23-41.

EMBRAPA. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica (AGEITEC):** preparo convencional do solo. Brasília: Embrapa, 2016. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01_32_59200523355.html. Acesso em: 2 abr. 2024.

FERNANDES, H. C.; SILVEIRA, J. C. M. da; RINALDI, P. C. N. Avaliação do custo energético de diferentes operações agrícolas mecanizadas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1582-1587, 2008. DOI: 10.1590/S1413-70542008000500034.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Manual on integrated soil management and conservation practices**. Rome: FAO, 2000. (FAO Land and Water Bulletin, n. 8). ISBN 92-5-104417-1.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; TONON, B. C.; FARIAS, J. R. B.; OLIVEIRA, M. C. N. de; TORRES, E. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 137, p. 178-185, 2012. DOI: 10.1016/j.fcr.2012.09.003.

FREITAS, P. L. de. **Sistema Plantio Direto:** conceitos, adoção e fatores limitantes. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2005. (Comunicado técnico).

FUENTES-LLANILLO, R.; TELLES, T. S.; SOARES JUNIOR, D.; MELO, T. R. de; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A. Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 208, art. 104877, 2021. DOI: 10.1016/j.still.2020.104877.

GOMES JÚNIOR, W. L.; BARBOSA, F. T.; MELO, H. F. Desenvolvimento radicular e da parte aérea de cultivos de inverno em solos com diferentes texturas e graus de compactação. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 54, e20218314, 2023. DOI: 10.5935/1806-6690.20230020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Agropecuário 2006: Brasil, grandes regiões e unidades da federação. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 777 p. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=749. Acesso em: 20 mar. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário 2017.** Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: https://censos.ibge.gov.br/agro/2017. Acesso em: 12 abr. 2024.

MAIA, S. M. F.; MEDEIROS, A. S.; SANTOS, T. C.; LYRA, G. B.; LAL, R.; ASSAD, E. D.; CERRI, C. E. P. Potential of no-till agriculture as a nature-based solution for climate-change mitigation in Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 220, art. 105368, 2022. DOI: 10.1016/j.still.2022.105368.

MORAES, M. T. de; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; MASTROBERTI, A. A.; LEVIEN, R.; LEITNER,D.; SCHNEPF, A. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 200, art. 104611, 2020. DOI: 10.1016/j.still.2020.104611.

NUNES, M. R.; VAN ES, H. M.; SCHINDELBECK, R.; RISTOW, A. J.; RYAN, M. No-till and cropping system diversification improve soil health and crop yield. **Geoderma**, Amsterdam, v. 328, p. 30-43, 2018. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.04.031.

PECHE FILHO, A. **Mecanização do sistema plantio direto**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2010. (Artigo técnico).

REICHERT, J. M.; ROSA, V. T. da; VOGELMANN, E. S.; ROSA, D. P. da; HORN, R.; REINERT, D. J.; SATTLER, A.; DENARDIN, J. E. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 158, p. 123-136, 2016. DOI: 10.1016/j.still.2015.11.010.

ROQUE, A. A. de O.; SOUZA, Z. M. de; BARBOSA, R. S.; SOUZA, G. S. de. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 7, p. 744-750, 2010. DOI: 10.1590/S0100-204X2010000700016.

ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. **Cultivo mínimo**. *In:* Árvore do Conhecimento Cana-de-açúcar. Brasília: Embrapa, Agência Embrapa de Informação Tecnológica (AGEITEC), 2016. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_85_22122006154841.html. Acesso em: 5 mai. 2024.

SÁ, J. C. de M.; TIVET, F.; LAL, R.; BRIEDIS, C.; HARTMAN, D. C.; SANTOS, J. Z. dos; SANTOS, J. B. dos. Long-term tillage systems impacts on soil C dynamics, soil resilience and agronomic productivity of a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 136, p. 38-50, 2014. DOI: 10.1016/j.still.2013.09.010.

SANTIAGO, A. D.; ROSSETTO, R. **Preparo convencional. In: Árvore do Conhecimento Cana-de-açúcar**. Brasília: Embrapa, Agência Embrapa de Informação Tecnológica (AGEITEC), 2007. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_84_22122006154841.html. Acesso em: 2 mai. 2024.

STROHHAECKER, L.; HELMICH, J. J. Preparo convencional e cultivo mínimo do solo na cultura de mandioca em condições de adubação verde com ervilhaca e aveia preta. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 6, p. 953-957, 2000.

TAVARES, O. C. H.; LIMA, E.; ZONTA, E. Crescimento e produtividade da cana planta cultivada sob diferentes sistemas de preparo do solo e de colheita. **Acta Scientiarum**. Agronomy, Maringá, v. 32, n. 1, p. 61-68, 2010. DOI: 10.4025/actasciagron.v32i1.943.

CAPÍTULO 3

DINÂMICA DE MACRONUTRIENTES NO PERFIL DO SOLO SOB DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE CORREÇÃO DA ACIDEZ EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO

Ronilson Martins Silva
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo, Brasil

Arissa Maeshiro
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo, Brasil

Lucas Rezende Lozano
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo, Brasil

Inara Araújo Mota
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo, Brasil

João Paulo Bernardi Ferreira
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo, Brasil

Marcos Vinicius Proença de Oliveira
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo, Brasil

Fernanda de Fátima Silva Devechio
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo, Brasil

DOI: 10.52832/wed.221.1300

Resumo: A acidez do solo é um problema recorrente em áreas agrícolas, afetando cerca de 40% dos solos cultivados no mundo. Solos ácidos apresentam altos teores de alumínio trocável e baixa disponibilidade de fósforo (P), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), limitando o desenvolvimento radicular. Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos de diferentes corretivos de acidez na disponibilidade de macronutrientes em camadas de um Latossolo Vermelho distrófico. O experimento foi conduzido na USP/FZEA, em tambores de 83 cm preenchidos com solo peneirado. Os tratamentos incluíram controle, calcário comum, calcário premium, óxido em diferentes doses, magnesita e gesso agrícola. Os corretivos foram incorporados a 5 cm, avaliando-se Ca, Mg, P e enxofre (S) nas camadas de 0–10, 10–20 e 20–40 cm, aos 180 dias. O delineamento foi em blocos ao acaso, com quatro repetições. O Ca concentrou-se nas camadas superficiais, enquanto o Mg foi mais elevado com magnesita e Oxyfertil. O gesso proporcionou maiores teores de S em profundidade, e o P apresentou incremento apenas na camada superficial. A eficiência dos corretivos depende de sua composição e reatividade, influenciando a dinâmica dos nutrientes no perfil do solo.

Palavras-chave: Calagem. Fertilidade do solo. Manejo do solo.

1 INTRODUÇÃO

A acidez do solo é um dos principais fatores limitantes à produtividade agrícola, especialmente em regiões tropicais onde predominam solos altamente inte12mperizados, como os Latossolos Vermelhos distróficos. Esses solos caracterizam-se por baixa saturação por bases e elevada concentração de alumínio trocável, o que compromete a disponibilidade de nutrientes e o desenvolvimento radicular das plantas (Bossolani *et al.*, 2020).

A acidificação do solo pode resultar tanto de processos naturais como intemperismo e lixiviação quanto de práticas agrícolas intensivas, incluindo o uso de fertilizantes nitrogenados acidificantes e remoção contínua de nutrientes pelas colheitas (Kunhikrishnan *et al.*, 2016). Essa condição interfere diretamente na disponibilidade dos macronutrientes, uma vez que o pH influencia a solubilidade e as formas químicas de elementos essenciais, como fósforo, cálcio e magnésio (Cantarella *et al.*, 2022).

De acordo com Enesi *et al.* (2023), a calagem de solos ácidos é uma das práticas mais eficazes para aumentar o pH, reduzir a toxicidade do alumínio e melhorar a disponibilidade de nutrientes. A meta-análise conduzida pelos autores revelou que a incorporação do corretivo no solo proporciona maiores ganhos de produtividade quando comparada à aplicação superficial. Resultados semelhantes foram relatados por Staugaitis *et al.* (2022), ao observarem que a aplicação intensiva de calcário em solos distróficos reduziu significativamente o alumínio trocável e alterou positivamente a disponibilidade de fósforo e potássio.

A correção da acidez do solo é uma prática fundamental para aumentar a disponibilidade de nutrientes e otimizar a produtividade de culturas (Matos *et al.*, 2025). Essa prática também é responsável por promover o aumento da disponibilidade de macronutrientes no solo (Dahal, 2024). Estudos recentes reforçam essa importância. Amoakwah *et al.* (2024) verificaram que a aplicação

de gesso e calcário em camadas profundas aumentou a saturação por bases e reduziu a saturação por alumínio até 25 cm de profundidade, indicando melhora na fertilidade subsuperficial.

Os corretivos utilizados, como os calcários e os óxidos, apresentam diferentes particularidades nas reações de neutralização da acidez e no movimento no perfil do solo (Fujii *et al.*, 2022). Assim, a escolha adequada do tipo de corretivo influencia diretamente a disponibilidade de macronutrientes, como cálcio, magnésio, potássio, fósforo e enxofre, fundamentais para o crescimento vegetal (Enesi *et al.*, 2023).

Além dos benefícios químicos, a correção da acidez também impacta a microbiota do solo. Segundo Zhou *et al.* (2025), a calagem de longo prazo contribui para a estabilidade das comunidades microbianas envolvidas no ciclo do nitrogênio, reduzindo variações sazonais e melhorando a eficiência dos processos de mineralização. Essa interação entre correção química e biológica reforça a necessidade de manejo integrado da acidez.

Portanto, compreender os mecanismos de ação dos diferentes corretivos de acidez e seus efeitos sobre a disponibilidade de macronutrientes em diferentes camadas do solo é essencial para o manejo sustentável da fertilidade em solos tropicais.

2 METODOLOGIA

O experimento foi instalado em tambores, em área localizada no Departamento de Zootecnia, Setor das Ciências Agrárias, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP) em Pirassununga/SP.

Foi utilizado no estudo um Latossolo Vermelho distrófico (45-55% de argila), cuja caracterização química está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Análise química das camadas 0,0 a 0,10m e 0,10 a 0,20m do Latossolo Vermelho distrófico do experimento.

camada (m)	pH	P (res)	S	K	Ca	Mg	Al	H+Al	M.O	C.T.	SB	CTC	V	M	B	Cu	Fe	Mn	Zn
		mg/dm³			mmolc/dm³				g/kg		mmolc/dm³		%		mg/dm³ (ppm)				
0,0-0,1	4,4	3	3	0,2	4	3	2,8	26	16	9,4	7	33	22	28	0,34	3,8	37	1,8	0,5
0,1-0,2	4,3	12	6	0,2	3	2	3	27	15	8,6	5	33	16	37	0,14	3,8	36	0,2	0,3

Fonte: Autores, 2026.

O solo foi coletado da área de origem com auxílio de uma pá carregadeira, retirando a pastagem implantada e coletando apenas as camadas estratificadas de solo. Posteriormente o solo foi peneirado e acondicionado em tambores.

Foram utilizadas as seguintes fontes de material neutralizante:

1) Calcário comum da região - PRNT=70%

2) Calcário Belocal Premium - PRNT=95%
3) Oxyfertil - 60% CaO e 30% MgO – PRNT=175%
4) Magnesita - Ibar – MgO
5) Gesso agrícola

Os tratamentos foram os seguintes (Tabela 2):

Tabela 2 – Tratamentos do experimento com fontes de materiais neutralizantes.

PRODUTO	DOSAGEM	SIGLA
T1. Solo sem calcário	Zero	Controle
T2. Calcário comum (região)	para elevar V%=70	CC
T3. Calcário Belocal Premium	para elevar V%=70	BP
T5. Oxyfertil Belocal - D1	1/3 dose do calcário CC	Ox1
T4. Oxyfertil Belocal – D2	para elevar V%=70	Ox2
T6 Oxyfertil Belocal - D3	1/2 dose do Calcário CC	Ox3
T7. Magnesita	para elevar V%=70	Mg
T8. Gesso agrícola	NG*	GA

*NG=[(50-V1).CTC]/500

Fonte: Autores, 2026.

Os tambores apresentavam as seguintes dimensões: 83 cm centímetros de profundidade e 40 cm de diâmetro (área igual a 0,1256m^2). Eles foram lavados e furados no fundo para permitir o escoamento da água.

Dentro de cada tambor, foram colocadas uma camada de pedra (10 cm), uma camada de pedrisco (10 cm) e uma camada de areia grossa (10 cm). Sobre a areia grossa foi colocado o solo até completar o tambor.

Sobre a terra nos tambores, foram colocados os produtos em suas devidas dosagens (Tabela 3).

Tabela 3 – Dosagem, em kg/ha e em g/tambor, de cada material que será utilizado no experimento com fontes de calcários.

Tratamento	Fontes	Dosagem	
		kg/há	g/tambor
T2	**Calcário comum (região)**	2404,3	30,20
T3	**Calcário Belocal Premium**	1771,5	22,25
T5	**Oxyfertil Belocal – D1**	801,4	10,10
T4	**Oxyfertil Belocal – D2**	960,0	12,00
T6	**Oxyfertil Belocal - D3**	1202,1	15,10
T7	**Magnesita**	960,0	12,00
T8	**Gesso agrícola**	2046,0	25,70

Fonte: Autores, 2026.

Observação: necessidade de calagem (NC), em Kg/ha, calculada pela fórmula: NC=[(V2-V1).CTC]/PRNT.100, sendo:

V2=70% (para T2, T3, T4 e T7)

V1=19 (V% da Tabela 1, considerando a média entre as camadas analisadas);

CTC=33 (Tabela 1, considerando a média entre as camadas analisadas);

PRNT de cada material; e Área do tambor= 0,1256m^2

Os produtos foram incorporados ao solo a uma profundidade de 5 cm. Imediatamente após a aplicação dos produtos, foi aplicada água (equivalente a 10 mm) sobre o solo para que houvesse umidade para o material reagir.

As amostragens foram realizadas aos 180 dias após a aplicação (DAA) dos tratamentos; e em 3 (três) camadas de solo: 0,0 a 10,0 cm; 10,0 a 20,0 cm e 20,0 a 40,0 cm.

Os atributos químicos do solo avaliados foram macronutrientes cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P) e enxofre (S).

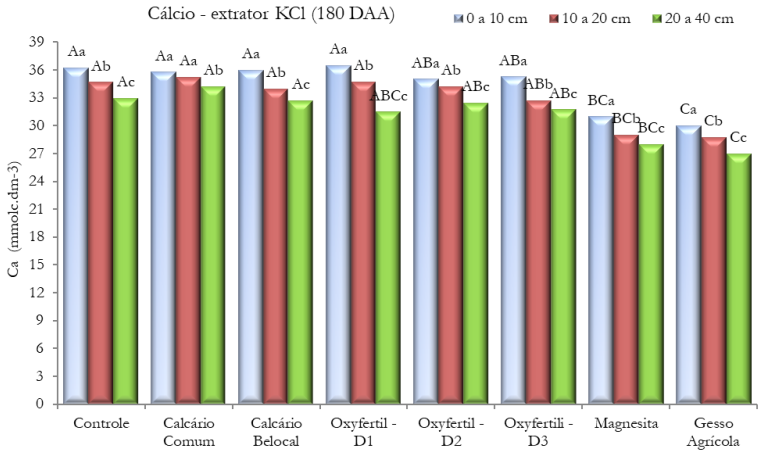
O delineamento foi em blocos ao acaso com 4 blocos. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey a 5% para comparação de médias.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1, observa-se que os teores de cálcio apresentaram redução com o aumento da profundidade em todos os tratamentos, indicando a baixa mobilidade desse nutriente no solo. O cálcio tende a permanecer concentrado nas camadas superficiais, especialmente na região de aplicação dos corretivos, devido à sua limitada capacidade de lixiviação no perfil do solo.

Não houve diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos controle, calcário comum, calcário premium e Oxyfertil D1, os quais apresentaram maiores teores de cálcio em comparação aos demais tratamentos avaliados. Esse resultado sugere que essas fontes foram mais eficientes em disponibilizar cálcio nas camadas superficiais, sem, contudo, promover incremento expressivo nas camadas mais profundas.

Figura 1 – Cálcio (Ca) – extrator KCl – em três camadas de um Latossolo Vermelho distrófico aos 180 dias após a aplicação (DAA) dos materiais neutralizantes da acidez em 3 camadas de solo.

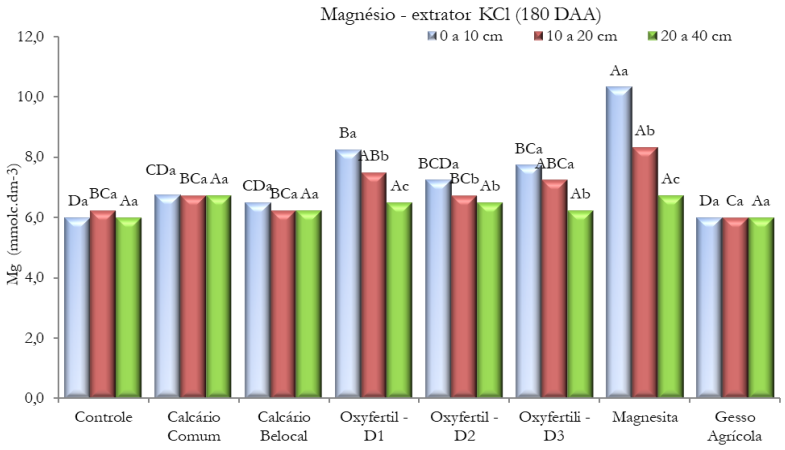


Nota: Letras maiúsculas referem-se à comparação de tratamentos numa mesma camada e as minúsculas comparam médias das camadas de um mesmo tratamento. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. CV (%) = 10,12 e DMS = 4,56 (entre tratamentos) e CV (%) = 3,07 e DMS = 0,61 (entre camadas).

Fonte: Autores, 2026.

Em relação aos teores de magnésio no solo (Figura 2), não foram observadas diferenças estatisticamente significativas nas camadas analisadas entre os tratamentos controle, calcário comum, calcário premium e gesso agrícola. Entretanto, nos tratamentos que receberam Oxyfertil, todas as doses apresentaram aumento dos teores de magnésio na camada superficial, indicando maior disponibilidade do nutriente nesta faixa do perfil.

Figura 2 – Magnésio (Mg) – extrator KCl – em três camadas de um Latossolo vermelho distrófico aos 180 dias após a aplicação (DAA) dos materiais neutralizantes da acidez.



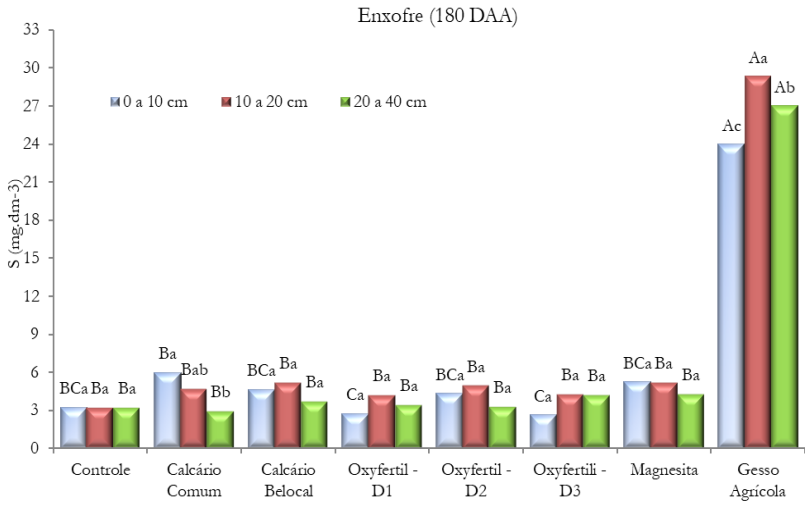
Nota: Letras maiúsculas referem-se à comparação de tratamentos numa mesma camada e as minúsculas comparam médias das camadas de um mesmo tratamento. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. CV (%) = 11,82 e DMS = 1,29 (entre tratamentos) e CV (%) = 5,96 e DMS = 0,70 (entre camadas).

Fonte: Autores, 2026.

O tratamento com Magnesita apresentou os maiores teores de magnésio em todas as camadas analisadas, sendo seguido pelos tratamentos com Oxyfertil. Esses resultados sugerem que a Magnesita promove uma liberação mais uniforme e efetiva de magnésio ao longo do perfil do solo, enquanto o Oxyfertil concentra seus efeitos principalmente na camada superficial.

O solo que recebeu gesso agrícola apresentou os maiores teores de enxofre entre os tratamentos (Figura 3), resultado esperado em função da alta concentração desse elemento na composição química do gesso. Observou-se, entretanto, que nesse tratamento os teores de enxofre foram menores na camada superficial, refletindo a elevada mobilidade do nutriente no perfil do solo, que favorece seu deslocamento para camadas mais profundas.

Figura 3 – Enxofre (S) em três camadas de um Latossolo Argiloso aos 180 dias após a aplicação (DAA) dos materiais neutralizantes da acidez.



Nota: Letras maiúsculas referem-se à comparação de tratamentos numa mesma camada e as minúsculas comparam médias das camadas de um mesmo tratamento. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. CV (%) = 26,62 e DMS = 3,13 (entre tratamentos) e CV (%) = 16,07 e DMS = 1,90 (entre camadas).

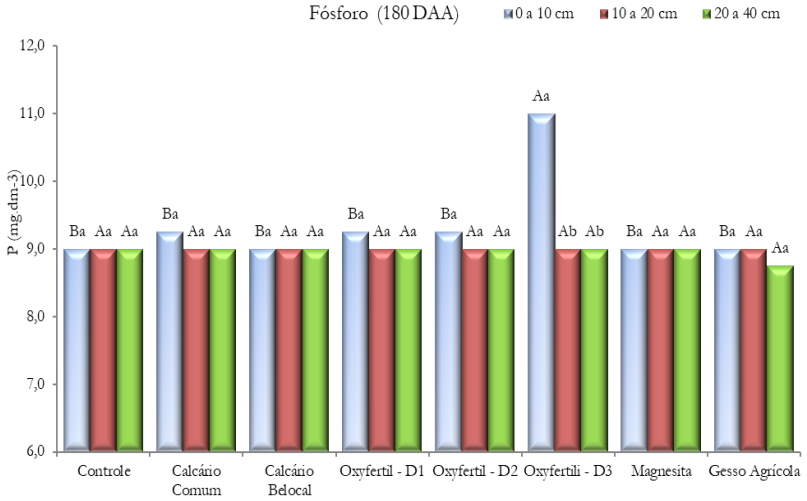
Fonte: Autores, 2026.

Nos demais tratamentos, não foram constatadas diferenças estatisticamente significativas nos teores de enxofre entre as camadas analisadas, exceto no tratamento com calcário comum, que apresentou ligeira variação nos teores superficiais. Esses resultados reforçam o papel do gesso agrícola como fonte eficiente de enxofre e sua capacidade de redistribuição no solo, contribuindo para o suprimento do nutriente em maiores profundidades.

O teor de fósforo apresentou incremento apenas na camada de 0–10 cm para o tratamento com Oxyfertil na dose D3 (Figura 4), indicando que o produto favoreceu a disponibilidade imediata do nutriente na zona de aplicação. Esse comportamento confirma a baixa mobilidade do fósforo no solo, que tende a permanecer retido nas camadas superficiais devido à alta capacidade

de adsorção aos colóides minerais, especialmente em Latossolos, ricos em óxidos de ferro e alumínio. Nos demais tratamentos, não foram observadas diferenças estatísticas significativas, sugerindo que as fontes e doses aplicadas não promoveram alterações expressivas na disponibilidade de fósforo nas demais profundidades avaliadas.

Figura 4 – Fósforo (P resina) em três camadas de um Latossolo Argiloso aos 180 dias após a aplicação (DAA) dos materiais neutralizantes da acidez.



Nota: Letras maiúsculas referem-se à comparação de tratamentos numa mesma camada e as minúsculas comparam médias das camadas de um mesmo tratamento. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. CV (%) = 6,69 e DMS = 0,83 (entre tratamentos) e CV (%) = 6,2 e DMS = 0,36 (entre camadas).

Fonte: Autores, 2026.

Os resultados obtidos evidenciam o comportamento distinto dos macronutrientes cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S) e fósforo (P) em um Latossolo Vermelho distrófico submetido à aplicação de diferentes corretivos de acidez em camadas estratificadas do solo. Observou-se que o cálcio apresentou redução dos teores com o aumento da profundidade, confirmando sua baixa mobilidade no perfil do solo. Esse comportamento é característico de solos tropicais altamente intemperizados, nos quais o cálcio tende a permanecer retido nas camadas superficiais devido à baixa solubilidade dos carbonatos e óxidos presentes nos corretivos aplicados (Veloso *et al.*, 2020). Segundo Amoakwah *et al.* (2024), a lenta dissolução desses materiais e a baixa lixiviação do cálcio explicam a concentração do nutriente nas camadas onde o calcário é incorporado.

Para o magnésio, os resultados mostraram que não houve diferenças significativas entre a maioria dos tratamentos, exceto naqueles com Oxyfertil e Magnesita, que proporcionaram maiores teores do nutriente. Esse efeito está relacionado à solubilidade e reatividade das fontes aplicadas, sendo a Magnesita reconhecida por liberar o magnésio de forma gradual e eficiente ao longo do tempo (Enesi *et al.*, 2023). Estudos recentes de AMOAKWAH *et al.* (2024) também destacam que

a composição química dos corretivos influencia diretamente a disponibilidade de cátions básicos, como Ca^{2+} e Mg^{2+}, no solo.

O comportamento do enxofre diferiu dos demais nutrientes, com destaque para o tratamento com gesso agrícola, que apresentou os maiores teores do elemento. Esse resultado deve-se à alta concentração de sulfato (SO_4^{2-}) na composição do gesso e à sua elevada mobilidade no solo, que favorece a redistribuição do nutriente para camadas mais profundas (Staugaitis *et al.*, 2022). De acordo com Amoakwah *et al.* (2024), o uso do gesso agrícola é uma estratégia eficiente não apenas para o fornecimento de enxofre, mas também para a melhoria das condições químicas do solo em profundidade, beneficiando o crescimento radicular.

No caso do fósforo, verificou-se incremento apenas na camada superficial (0–10 cm) no tratamento com Oxyfertil D3, confirmando sua baixa mobilidade e alta fixação em solos tropicais. O fósforo tende a permanecer adsorvido aos óxidos de ferro e alumínio presentes em Latossolos, formando compostos pouco solúveis e reduzindo sua disponibilidade para as plantas (da Silva *et al.*, 2024). Macedo *et al.* (2022) destacam que a retenção do fósforo é intensificada em solos de elevada acidez e alta atividade coloidal, exigindo o uso de fontes mais reativas ou técnicas de aplicação localizada para aumentar sua eficiência. A maior concentração observada com Oxyfertil pode estar associada à sua maior solubilidade e reatividade, o que favorece a liberação do nutriente na zona de aplicação (Ferreira *et al.*, 2023; Alfaro *et al.*, 2025).

De forma geral, os resultados confirmam que a mobilidade e a disponibilidade dos macronutrientes variam conforme as características químicas dos corretivos e as propriedades do solo. Enquanto o cálcio e o magnésio permanecem concentrados nas camadas superficiais, o enxofre apresenta alta mobilidade, e o fósforo tende à fixação. Assim, o uso combinado de corretivos como calcário e gesso agrícola, associado a fontes mais solúveis de fósforo, mostra-se uma estratégia promissora para melhorar a eficiência nutricional e a fertilidade dos Latossolos (Ferreira *et al.*, 2023; Amoakwah *et al.*, 2024).

4 CONCLUSÃO

Conclui-se que os diferentes tipos de corretivos de acidez influenciaram de forma distinta a disponibilidade dos macronutrientes no Latossolo Vermelho distrófico, tendo em vista que a eficiência dos corretivos depende tanto da natureza química do material quanto das características do solo, uso de diferentes fontes de cálcio, magnésio e enxofre configura uma estratégia promissora para melhorar a fertilidade e o equilíbrio nutricional de solos tropicais ácidos.

Agradecimentos e financiamento

Agradeço ao Grupo de Pesquisa das Agrárias (GPA) pelo apoio técnico, científico e pela oportunidade de aprendizado durante o desenvolvimento deste trabalho. À Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo (FZEA/USP), pela estrutura e infraestrutura disponibilizadas para a realização dos experimentos.

REFERÊNCIAS

ALFARO, M. A.; CARDENAS, L.; SALAZAR, F.; HATCH, D.; RAMÍREZ, L. Papel da calagem e da aplicação de nitrogênio na determinação de baixas perdas de nitrogênio por lixiviação em solos vulcânicos. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 25, p. 1059–1074, 2025. https://doi.org/10.1007/s42729-024-02184-z

AMOAKWAH, E.; KIM, S. H.; JEON, S.; SHIM, J. H.; LEE, Y. H.; KWON, S. I.; ARK, S. J. Long-term fertilization and liming increase soil fertility but reduce carbon stratification and stocks of paddy rice soils. **Frontiers in Soil Science**, v. 4, p. 1426894, 2024. https://doi.org/10.3389/fsoil.2024.1426894

BOSSOLANI, J. W.; CRUSCIOL, C. A. C.; MERLOTI, L. F.; MORETTI, L. G.; COSTA, N. R.; TSAI, S. M.; KURAMAE, E. E. Long-term lime and gypsum amendment increase nitrogen fixation and decrease nitrification and denitrification gene abundances in the rhizosphere and soil in a tropical no-till intercropping system. **Geoderma**, v. 375, p. 114476, 2020. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114476

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; VAN RAIJ, B. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. *In* R. F. Novais *et al.* (Eds.), **Fertilidade do solo** (2nd ed., pp. 585–642). Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2022.

DAHAL, H. A new approach to measure spatial variability of soil parameters and field technique to test-value specific fertilizer recommendations. **Advances in Modern Agriculture**, *5*, e2401, 2024.

DA SILVA, L. J. R.; DA SILVA SANDIM, A.; DA SILVA, A. P. R.; DEUS, A. C. F.; ANTONANGELO, J. A.; BÜLL, L. T. Evaluating the agronomic efficiency of alternative phosphorus sources applied in Brazilian tropical soils. **Scientific Reports**, *14*, 8526, 2024. https://doi.org/10.1038/s41598-024-58911-0

ENESI, I. O.; DYCK, M.; CHANG, S.; THILAKARATHNA, M. S.; FAN, X.; STRELKOV, S.; GORIM, L. Y. Liming of acidic soils improves crop productivity: A meta-analysis. **Frontiers in Agronomy**, *5*, 1194896, 2023.

FERREIRA, R. A.; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L.; CURI, N.; OLIVEIRA, G. C.; GUILHERME, L. R. G. Phosphorus dynamics and corrective management in tropical soils under liming and gypsum application. **Soil Research**, v. 61, p. 842–854, 2023.

FUJI, K.; FUNAKAWA, S.; KOSAKI, T. Effects of forest management on soil acidification in cedar plantation. **Geoderma**, v. 424, p. 115967, 2022. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115967

KUNHIKRISHNAN, A.; BOLAN, N. S.; MEEHAN, B.; NAIDU, R.; KIM, W. I.; KIM, P. J.; OK, Y. S. Functional relationships of soil acidification, liming, and soil processes. **Advances in Agronomy**, v. 141, p. 1–71, 2016.

MACEDO, J. R.; MOREIRA, S. G.; MORAES, F. A.; REIS JUNIOR, D. S.; PEIXOTO, D. S.; SILVA, B. M.; SILVA, J. C. R. The management of phosphate fertilization affects soil phosphorus and yield of autumn/winter crops. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 45, n.1, e57336, 2022. https://doi.org/10.4025/actasciagron.v45i1.57336

MATOS, A. P.; MATIAS, S. S. R.; PIRES, M. F. M.; COSTA, R. M.; OLIVEIRA NETO, C. J.; FERREIRA, M. V. L.; BATISTA, R. A. Distribuição espacial de nutrientes em folhas de bananeira sob efeito da calagem. **Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering**, v. 29, n. 11, e293164, 2025.

STAUGAITIS, G.; MAZEIKA, R.; SLEPETIENĖ, A.; SLEPETYS, J.; LIAUDANSKIENĖ, I.; KADZIULIENĖ, Z. Impact of liming on soil properties and humified organic matter fractions in acidic soil. **Sustainability**, v. 14, n. 9, p. 5297, 2022.

VELOSO, C. A. C.; ARAUJO, S. M. B.; RODRIGUES, J. E. L. F.; SILVA, A. R. Correção da acidez do solo. *In*: **Recomendações de manejo e conservação do solo e da água**. Embrapa, 2020.

ZHOU, J.; WANG, X.; LI, Y.; CHEN, D.; ZHANG, Q.; LIU, X.; YANG, Z.; WU, J. (2025). Long-term liming stabilizes nitrogen-cycling microbial communities in acidic soils. **Biology and Fertility of Soils**, v. 61, n. 1, 2025. https://doi.org/10.1007/s00374-025-01889-2

PARTE II — FERTILIDADE DO SOLO, BIOINSUMOS E NUTRIÇÃO VEGETAL

CAPÍTULO 4

POTENCIAL DAS BACTÉRIAS SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO NA REDUÇÃO DA APLICAÇÃO DE INSUMOS MINERAIS FOSFATADOS NA AGRICULTURA

Rafaela Felix da França
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco – UFAPE, Brasil

Diogo Paes da Costa
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco – UFAPE, Brasil

Érika Valente de Medeiros
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco – UFAPE, Brasil

Sarah Jane Alexandre Medeiros
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco – UFAPE, Brasil

José Romualdo de Sousa Lima
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco – UFAPE, Brasil

DOI: 10.52832/wed.221.1301

Resumo: O fósforo (P) é um macronutriente essencial ao crescimento vegetal e o principal fator limitante da produção agrícola em solos tropicais intemperizados. A adubação fosfatada mineral convencional apresenta baixa eficiência de aproveitamento, elevado custo e riscos ambientais relacionados à eutrofização de corpos hídricos. As bactérias solubilizadoras de fósforo (BSP) constituem alternativa biotecnológica promissora, atuando por mecanismos como produção de ácidos orgânicos, acidificação da rizosfera, secreção de fosfatases e quelatação de cátions. Gêneros como *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azospirillum* e *Rhizobium* demonstraram expressiva capacidade solubilizadora em condições controladas e a campo, com incrementos na disponibilidade de P variando entre 20 e 60%. Revisões da literatura indicam que a inoculação com BSP pode reduzir em 25 a 50% a dose de fertilizante fosfatado mineral sem comprometer a produtividade das culturas, com benefícios agronômicos, econômicos e ambientais expressivos. Este capítulo discute os mecanismos bioquímicos envolvidos, os principais microrganismos solubilizadores, as interações planta-bactéria, o potencial na redução do uso de insumos minerais fosfatados e os desafios para aplicação em larga escala, consolidando bases científicas para o desenvolvimento de bioinoculantes mais eficazes e sustentáveis.

Palavras-chave: Bioinoculantes. Fertilizantes fosfatados. Rizosfera. Sustentabilidade agrícola.

1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um elemento essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas, participando de processos metabólicos importantes, como transferência de energia, formação de membranas celulares e síntese de ácidos nucleicos. Na agricultura, a disponibilidade adequada desse nutriente no solo é fundamental para o desenvolvimento vegetativo e para a produtividade das culturas. No entanto, a deficiência de P ainda representa uma das principais limitações da produção agrícola mundial, especialmente em regiões tropicais, onde predominam solos altamente intemperizados e ricos em óxidos de ferro e alumínio (Sharma; Saini, 2021).

No Brasil, essa limitação se torna ainda mais relevante devido à baixa disponibilidade natural de fósforo nos solos agrícolas e à elevada dependência da importação de fertilizantes fosfatados. Além dos impactos econômicos relacionados às oscilações do mercado internacional, o uso intensivo desses fertilizantes também pode provocar problemas ambientais, como eutrofização de corpos hídricos e desequilíbrios nos ecossistemas aquáticos (Brownlie *et al.,* 2021). A crise global de fertilizantes observada entre 2021 e 2022 evidenciou ainda mais a vulnerabilidade do setor agrícola frente à dependência externa desse insumo.

Nesse contexto, as bactérias solubilizadoras de fósforo (BSP) têm recebido destaque como alternativa promissora para aumentar a eficiência do uso de fósforo na agricultura. Esses microrganismos atuam na disponibilização do P presente em formas insolúveis do solo por meio de diferentes mecanismos bioquímicos, contribuindo para reduzir a necessidade de fertilizantes minerais (França *et al.,* 2022). Assim, o presente capítulo tem como objetivo reunir informações da literatura científica sobre os principais mecanismos de ação das BSP, seus gêneros de maior

relevância agronômica, as interações estabelecidas com as plantas e seu potencial na redução do uso de fertilizantes fosfatados em sistemas agrícolas tropicais.

2 METODOLOGIA

Este trabalho constitui uma revisão bibliográfica de caráter qualitativo e descritivo, elaborada a partir de levantamento sistemático da literatura científica nas bases de dados PubMed, Scopus, Web of Science e Google Scholar. Foram utilizados os descritores: "phosphate solubilizing bacteria", "phosphorus biofertilizer", "rhizosphere", "bioinoculants" e "tropical soils", isolados e combinados. O período de busca privilegiou publicações entre 2010 e 2026, sem excluir clássicos fundamentais anteriores quando necessário à compreensão dos mecanismos. A seleção dos artigos obedeceu aos critérios de relevância temática, origem em periódicos indexados com revisão por pares e confiabilidade metodológica. Foram priorizados estudos conduzidos em solos tropicais e subtropicais, especialmente os relacionados às condições edafoclimáticas do Brasil.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Fósforo no Solo e Limitações da Adubação Convencional

O fósforo encontra-se no solo nas formas orgânica e inorgânica. Em solos tropicais brasileiros, especialmente os Latossolos, que geralmente apresentam pH entre 4,5 e 5,5 e elevados teores de gibsita, goethita e hematita, a adsorção do P aos óxidos de ferro e alumínio é considerada o principal fator responsável pela baixa disponibilidade desse nutriente às plantas. Nesses solos, a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) pode ultrapassar 1.500 mg de P por kg de solo, o que evidencia o elevado potencial de fixação do elemento (Novais; Smyth; Nunes, 2007).

Além disso, a eficiência de recuperação do fósforo proveniente da adubação mineral em culturas anuais tropicais costuma variar entre 10% e 30%, dependendo da cultura, das características químicas do solo e das condições de manejo (López-Arredondo *et al.,* 2014). Como consequência, os agricultores frequentemente utilizam doses elevadas de fertilizantes fosfatados para suprir a demanda das plantas, aumentando os custos de produção e os riscos de contaminação ambiental. Outro aspecto importante é a baixa mobilidade do P na solução do solo, cuja difusão pode ser até mil vezes menor que a do nitrogênio, favorecendo a rápida redução do nutriente na região rizosférica próxima às raízes (Hinsinger *et al.,* 2011; Rawat *et al.,* 2021).

3.2 Mecanismos de Solubilização de Fósforo por Bactérias

As bactérias solubilizadoras de fósforo atuam por diferentes mecanismos bioquímicos que contribuem para aumentar a disponibilidade de P no solo. Entre eles, a produção de ácidos orgânicos de baixo peso molecular, como os ácidos glucônico, cítrico, oxálico, málico e succínico, é considerada uma das principais vias de solubilização de fosfatos inorgânicos (FRANÇA *et al.,* 2022). O ácido glucônico, por exemplo, é produzido a partir da oxidação da glicose pela enzima glicose desidrogenase (GDH), dependente do cofator pirroloquinolina quinona (PQQ), sendo frequentemente associado à solubilização de fosfatos de cálcio por bactérias dos gêneros *Pseudomonas* e *Gluconobacter* (Rodriguez; Fraga, 1999; França *et al.,* 2022; Pan; Cai, 2023).

Outro mecanismo importante envolve a acidificação da rizosfera pela liberação de prótons durante o metabolismo do amônio. Essa alteração no pH ao redor das raízes favorece a dissolução de fosfatos ligados ao ferro e ao alumínio, aumentando a disponibilidade do nutriente na solução do solo (Dakora; Phillips, 2002; Elhaissoufi *et al.,* 2022). Além disso, as BSP produzem enzimas como fosfatases ácidas e alcalinas, responsáveis pela hidrólise de compostos orgânicos fosfatados, incluindo o fitato, considerado uma importante reserva de fósforo em sementes e resíduos orgânicos (Nannipieri *et al.,* 2003; Pang *et al.,* 2024). A produção de compostos capazes de quelatar cátions metálicos também auxilia nesse processo, reduzindo a adsorção do fósforo aos coloides do solo (Jones, 1998; Elhaissoufi *et al.,* 2022).

3.3 Principais Gêneros de BSP e Resultados Experimentais

O gênero *Bacillus* tem recebido destaque em estudos envolvendo solubilização de fósforo devido à sua capacidade de formar endósporos resistentes, característica que favorece a formulação de bioinoculantes com maior estabilidade e tempo de armazenamento. Espécies como *Bacillus subtilis, B. megaterium e B. amyloliquefaciens* apresentam potencial para solubilizar fosfato tricálcico, fosfato de alumínio e rocha fosfática (Kalayu, 2019; Rawat *et al.,* 2021). Alori, Glick e Babalola (2017) observaram que cepas de *B. subtilis* produziram ácido glucônico como principal metabólito relacionado à solubilização, promovendo redução significativa do pH do meio e aumento da disponibilidade de fósforo.

Entre as bactérias Gram-negativas, o gênero *Pseudomonas* também se destaca pela elevada capacidade solubilizadora associada à produção de ácido glucônico. Além disso, espécies como *Pseudomonas fluorescens* e *P. putida* produzem sideróforos, antibióticos e ácido indolacético (AIA), atuando não apenas na nutrição, mas também na promoção do crescimento vegetal e no controle biológico de patógenos (Vessey, 2003).

Azospirillum brasilense, amplamente utilizado na agricultura brasileira por sua capacidade de fixação biológica de nitrogênio, também apresenta potencial de solubilização de fósforo, principalmente em ambientes com menor pH. Hungria *et al.* (2010) verificaram incrementos na produtividade de milho inoculado com cepas Ab-V5 e Ab-V6, associando os resultados ao maior acúmulo de nutrientes e ao estímulo do desenvolvimento radicular.

O gênero *Rhizobium*, tradicionalmente relacionado à fixação biológica de nitrogênio em leguminosas, também apresenta potencial para solubilização de fósforo. Bargaz *et al.* (2018) relataram que a co-inoculação de *Rhizobium* com fungos micorrízicos arbusculares promoveu aumento na absorção de P em leguminosas, evidenciando a existência de interações sinérgicas entre diferentes grupos microbianos na rizosfera.

3.4 Interação entre BSP e Plantas

A interação entre bactérias solubilizadoras de fósforo e plantas envolve diferentes processos fisiológicos e bioquímicos na rizosfera. As raízes liberam exsudatos compostos por açúcares, aminoácidos e ácidos orgânicos, que estimulam a atividade microbiana ao redor do sistema radicular. Estima-se que até 40% do carbono fixado na fotossíntese possa ser liberado na rizosfera, favorecendo a proliferação de microrganismos benéficos, incluindo as BSP (Barea *et al.,* 2005; Bargaz *et al.,* 2021).

Em resposta, muitas dessas bactérias produzem substâncias promotoras de crescimento vegetal, como o ácido indolacético (AIA), que estimula a formação de raízes laterais e pelos radiculares, aumentando a superfície de absorção das plantas (Glick, 2012; De Zutter *et al.,* 2022). Algumas cepas também produzem ACC deaminase, enzima responsável pela degradação do precursor do etileno, hormônio associado à inibição do crescimento vegetal em condições de estresse (Glick *et al.,* 2007). Dessa forma, além de aumentar a disponibilidade de fósforo, as BSP contribuem para o melhor desenvolvimento radicular e para maior eficiência na absorção de nutrientes.

3.5 Potencial na Redução do Uso de Fertilizantes Fosfatados

Diversos estudos têm demonstrado que a inoculação com bactérias solubilizadoras de fósforo pode reduzir significativamente a necessidade de fertilizantes fosfatados minerais sem comprometer a produtividade das culturas. Sharma e Saini (2021), em revisão envolvendo diferentes experimentos conduzidos em regiões tropicais, observaram incrementos de produtividade variando entre 15% e 40% em culturas inoculadas com BSP quando comparadas aos tratamentos sem inoculação.

Segundo Alori, Glick e Babalola (2017), a associação entre BSP e doses reduzidas de fertilizantes minerais pode proporcionar rendimento semelhante ao obtido com adubação convencional em dose plena. Em trabalhos conduzidos no Brasil, Hungria *et al.* (2010) verificaram que a inoculação com *Azospirillum brasilense* associada à redução da dose de NPK manteve produtividades equivalentes às obtidas com adubação completa, além de reduzir custos de produção. Fukami, Cerezini e Hungria (2018) destacam ainda que os benefícios de *Azospirillum* vão além da fixação biológica de nitrogênio, incluindo melhorias na absorção de fósforo em função do maior desenvolvimento radicular estimulado pelos fitormônios produzidos pelas bactérias.

3.6 Benefícios e Desafios para Aplicação em Larga Escala

Além do aumento na disponibilidade de fósforo, as BSP podem contribuir para o controle biológico de patógenos do solo, principalmente pela produção de sideróforos e outros metabólitos associados à competição microbiana (França *et al.,* 2022). Outro aspecto relevante é o potencial de redução dos impactos ambientais associados ao uso excessivo de fertilizantes fosfatados, como a eutrofização de corpos hídricos e a exploração intensiva das reservas de rocha fosfática, consideradas recursos não renováveis (Cordell; Drangert; White, 2009; Brownlie *et al.,* 2021).

Do ponto de vista econômico, a redução parcial da adubação fosfatada pode representar diminuição significativa nos custos de produção agrícola. Entretanto, a adoção em larga escala ainda enfrenta desafios importantes, como a variabilidade dos resultados em condições de campo, a competição das cepas inoculadas com a microbiota nativa do solo e dificuldades relacionadas à estabilidade dos bioinoculantes durante o armazenamento, especialmente em bactérias não esporulantes como *Pseudomonas* (Bashan *et al.,* 2014; Pan; Cai, 2023). Além disso, questões regulatórias e a necessidade de maior difusão de conhecimento técnico sobre manejo e aplicação dos inoculantes ainda limitam a expansão dessa tecnologia no setor agrícola.

Nos últimos anos, o avanço do mercado de bioinsumos e o interesse por sistemas agrícolas mais sustentáveis têm ampliado as pesquisas envolvendo bactérias solubilizadoras de fósforo. Além da redução parcial da dependência de fertilizantes minerais, esses microrganismos têm sido associados ao aumento da eficiência do uso de nutrientes, melhoria da qualidade biológica do solo e maior sustentabilidade dos sistemas produtivos. Estudos recentes também destacam o potencial das BSP na integração com outras tecnologias biológicas, como coinoculação e uso de biofertilizantes multifuncionais, especialmente em solos tropicais altamente intemperizados (Silva *et al.,* 2023; Wang *et al.,* 2023).

4 CONCLUSÃO

As bactérias solubilizadoras de fósforo apresentam grande potencial para contribuir com sistemas agrícolas mais eficientes e sustentáveis, especialmente em solos tropicais com elevada capacidade de fixação de fósforo. Por meio de diferentes mecanismos bioquímicos, esses microrganismos são capazes de disponibilizar formas pouco solúveis de P no solo, favorecendo a absorção do nutriente pelas plantas e aumentando a eficiência da adubação fosfatada.

Estudos realizados nos últimos anos demonstram que gêneros como *Bacillus, Pseudomonas, Azospirillum* e *Rhizobium* podem auxiliar na redução parcial da aplicação de fertilizantes fosfatados minerais sem prejuízos significativos à produtividade das culturas. Além dos benefícios relacionados à nutrição vegetal, o uso dessas bactérias pode contribuir para a redução de custos de produção e dos impactos ambientais associados ao uso excessivo de fertilizantes.

Apesar dos resultados promissores, a aplicação das BSP em larga escala ainda depende de avanços relacionados à formulação dos inoculantes, estabilidade das cepas, adaptação às diferentes condições de solo e maior difusão de conhecimento técnico entre os produtores. Nesse sentido, o fortalecimento das pesquisas voltadas à microbiologia agrícola e ao desenvolvimento de bioinsumos será fundamental para ampliar o uso dessas tecnologias na agricultura brasileira.

Agradecimentos

À Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE) pelo apoio institucional, à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte à pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALORI, E. T.; GLICK, B. R.; BABALOLA, O. O. Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, p. 971, 2017. DOI: 10.3389/fmicb.2017.00971.

BAREA, J. M.; POZO, M. J.; AZCÓN, R.; AZCÓN-AGUILAR, C. Microbial co-operation in the rhizosphere. **Journal of Experimental Botany**, v. 56, n. 417, p. 1761-1778, 2005. DOI: 10.1093/jxb/eri197.

BARGAZ, A.; LYAMLOULI, K.; CHTOUKI, M.; ZEROUAL, Y.; DHIBA, D. Soil microbial resources for improving fertilizers efficiency in an integrated plant nutrient management system. **Frontiers in Microbiology**, v. 9, p. 1606, 2018. DOI: 10.3389/fmicb.2018.01606.

BARGAZ, A.; ELHAISSOUFI, W.; KHOURCHI, S.; BENMRID, B.; BORDEN, K. A.; RCHIAD, Z. Benefits of phosphate solubilizing bacteria on belowground crop performance for improved crop acquisition of phosphorus. **Microbiological Research**, v. 252, p. 126842, 2021. DOI: 10.1016/j.micres.2021.126842.

BASHAN, Y.; DE-BASHAN, L. E.; PRABHU, S. R.; HERNANDEZ, J. P. Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998–2013). **Plant and Soil**, v. 378, n. 1-2, p. 1-33, 2014. DOI: 10.1007/s11104-013-1956-x.

BROWNLIE, W. J.; SUTTON, M. A.; REAY, D. S.; HEAL, K. V.; HERMANN, L.; KABBE, C.; SPEARS, B. M. Global actions for a sustainable phosphorus future. **Nature Food**, v. 2, n. 2, p. 71-74, 2021. DOI: 10.1038/s43016-021-00232-w.

CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, v. 19, n. 2, p. 292-305, 2009. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009.

DAKORA, F. D.; PHILLIPS, D. A. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. **Plant and Soil**, v. 245, p. 35-47, 2002. DOI: 10.1023/A:1020197109895.

DE ZUTTER, N.; AMEYE, M.; BEKAERT, B.; VERWAEREN, J.; DE GELDER, L.; AUDENAERT, K. Uncovering new insights and misconceptions on the effectiveness of phosphate solubilizing rhizobacteria in plants: a meta-analysis. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 858804, 2022. DOI: 10.3389/fpls.2022.858804.

ELHAISSOUFI, W.; GHOULAM, C.; BARAKAT, A.; ZEROUAL, Y.; BARGAZ, A. Phosphate bacterial solubilization: a key rhizosphere driving force enabling higher P use efficiency and crop productivity. **Journal of Advanced Research**, v. 38, p. 13-28, 2022. DOI: 10.1016/j.jare.2021.08.014.

FRANÇA, R. F.; MEDEIROS, E. V.; SILVA, R. O.; FAUSTO, R. A. S.; SOUZA, C. A. F.; OLIVEIRA, J. B.; LIMA, J. R. S.; ARAÚJO, A. P. Perspectives for biochar as a vehicle for inoculation of phosphate solubilizing bacteria: a review. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 1, e36211124885, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i1.24885.

FUKAMI, J.; CEREZINI, P.; HUNGRIA, M. *Azospirillum*: benefits that go far beyond biological nitrogen fixation. **AMB Express**, v. 8, n. 1, p. 73, 2018. DOI: 10.1186/s13568-018-0608-1.

GLICK, B. R. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. **Scientifica,** 2012. DOI: 10.6064/2012/963401.

GLICK, B. R.; CHENG, Z.; CZARNY, J.; DUAN, J. Promotion of plant growth by ACC deaminase-producing soil bacteria. **European Journal of Plant Pathology**, v. 119, n. 3, p. 329-339, 2007. DOI: 10.1007/s10658-007-9162-4.

HINSINGER, P.; BRAUMAN, A.; DEVAU, N.; GÉRARD, F.; JOURDAN, C.; LACLAU, J. P.; LE CADRE, E.; JAILLARD, B.; PLASSARD, C. Phosphorus for food – depleted soil to feed the world in 2050. **Global Change Biology**, v. 17, n. 7, p. 3430-3451, 2011. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02418.x.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; SOUZA, E. M.; PEDROSA, F. O. Inoculation with selected strains of *Azospirillum brasilense* and *A. lipoferum* improves yields of maize and wheat in Brazil. **Plant and Soil**, v. 331, n. 1-2, p. 413-425, 2010. DOI: 10.1007/s11104-009-0262-0.

JONES, D. L. Organic acids in the rhizosphere – a critical review. **Plant and Soil,** v. 205, n. 1, p. 25-44, 1998. DOI: 10.1023/A:1004356007312.

KALAYU, G. Phosphate solubilizing microorganisms: promising approach as biofertilizers. **International Journal of Agronomy**, 2019. DOI: 10.1155/2019/4917256.

LÓPEZ-ARREDONDO, D. L.; LEYVA-GONZÁLEZ, M. A.; GONZÁLEZ-MORALES, S. I.; LÓPEZ-BUCIO, J.; HERRERA-ESTRELLA, L. Phosphate nutrition: improving low-phosphate tolerance in crops. **Annual Review of Plant Biology**, v. 65, p. 95-123, 2014. DOI: 10.1146/annurev-arplant-050213-035949.

NANNIPIERI, P.; ASCHER, J.; CECCHERINI, M. T.; LANDI, L.; PIETRAMELLARA, G.; RENELLA, G. Microbial diversity and soil functions. **European Journal of Soil Science**, v. 54, n. 4, p. 655-670, 2003. DOI: 10.1046/j.1351-0754.2003.0556.x.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 471-537.

PAN, L.; CAI, B. Phosphate-solubilizing bacteria: advances in their physiology, molecular mechanisms and microbial community effects. **Microorganisms**, v. 11, n. 12, p. 2904, 2023. DOI: 10.3390/microorganisms11122904.

PANG, F.; LI, Q.; SOLANKI, M. K.; WANG, Z.; BAI, Y.; DONG, C. Soil phosphorus transformation and plant uptake driven by phosphate-solubilizing microorganisms. **Frontiers in Microbiology**, v. 15, p. 1383813, 2024. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1383813.

RAWAT, P.; DAS, S.; SHANKHDHAR, D.; SHANKHDHAR, S. C. Phosphate-solubilizing microorganisms: mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, p. 49-68, 2021. DOI: 10.1007/s42729-020-00342-7.

RODRIGUEZ, H.; FRAGA, R. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. **Biotechnology Advances**, v. 17, n. 4-5, p. 319-339, 1999. DOI: 10.1016/S0734-9750(99)00014-2.

SHARMA, S. B.; SAINI, R. Phosphate solubilizing microorganism: functional diversity, mechanisms and application in agriculture. In: SHRIVASTAVA, N.; VARMA, A.; PRASAD, R. (ed.). **Soil Microbiomes for Sustainable Agriculture**. Cham: Springer, 2021. p. 195-228. DOI: 10.1007/978-3-030-73507-4_7.

SILVA, L. I.; SOUZA, R. C.; ZILLI, J. E.; KAY BHERING, L. L.; MEDEIROS, M. I. M.; FERREIRA, E. P. B. Phosphorus-solubilizing microorganisms: a key to sustainable agriculture. **Agriculture**, v. 13, n. 2, p. 1-30, 2023. DOI: 10.3390/agriculture13020462.

VESSEY, J. K. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. **Plant and Soil**, v. 255, n. 2, p. 571-586, 2003. DOI: 10.1023/A:1026037216893.

WANG, C.; ZHENG, M.; SONG, W.; WEN, S.; WANG, B.; ZHU, C.; SHEN, R. Phosphorus solubilizing microorganisms: potential promoters of agricultural and environmental engineering. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 11, p. 1181078, 2023. DOI: 10.3389/fbioe.2023.1181078.

CAPÍTULO 5

EFICIÊNCIA NUTRICIONAL DE ADUBOS BIOLÓGICOS E MINERAIS PARA A CULTURA DA RÚCULA

Fernanda de Fátima da Silva Devechio
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo, Brasil

Beatrice Mourthé Gutierres
Centro Universitário Octávio Bastos/ UNIFEOB, Brasil

João Pedro Carneiro De Medeiros
Centro Universitário Octávio Bastos/ UNIFEOB, Brasil

Ronilson Martins Silva
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo, Brasil

João Paulo Bernardi Ferreira
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo, Brasil

Jacqueline Regina Ceara Alves Correa
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo, Brasil

Talita Antonia Da Silveira
Centro Universitário Octávio Bastos/ UNIFEOB, Brasil

DOI: 10.52832/wed.221.1302

Resumo: A produção de hortaliças demanda práticas de manejo que aliem produtividade e sustentabilidade, destacando-se a busca por fontes alternativas de nutrientes. O uso de resíduos orgânicos, como o frass de tenébrios, tem despertado interesse como fertilizante biológico, devido ao seu potencial de fornecer nutrientes e melhorar as características do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial do frass de tenébrios como alternativa ao fertilizante mineral na produção de mudas de rúcula. O experimento foi conduzido em solo de baixa fertilidade), utilizando cinco tratamentos: controle (sem adubação), adubação mineral nas doses de 15 g e 7,5 g (4-14-8) e frass nas mesmas doses (15 g e 7,5 g), com uma muda por vaso. Após 42 dias, foram avaliados número de folhas, comprimento e largura das folhas, além de massa verde e seca. Os resultados indicaram que o frass promoveu desenvolvimento semelhante ao fertilizante mineral, com respostas positivas especialmente nas maiores doses, evidenciando sua eficiência como fonte de nutrientes para a cultura. Frass de tenébrios apresenta potencial como fertilizante alternativo na produção de mudas de rúcula, podendo substituir parcialmente adubos minerais. Além disso, sua utilização contribui para o aproveitamento de resíduos orgânicos.

Palavras-chave: Fertilidade do solo. Frass de tenébrios. Nutrição. Resíduos orgânicos. Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A rúcula (*Eruca sativa* Miller) é uma das hortaliças de folhas mais populares e amplamente consumidas em todo o mundo (Freitas *et al.*, 2017). No Brasil, é mais conhecida nos estados do Sul e Sudeste, porém, atualmente sua produção e consumo se espalhou por todo o território brasileiro (Grangeiro *et al.*, 2011). Portanto, sua produção eficiente é de grande importância.

A rúcula (*Eruca sativa* Miller) é uma das hortaliças folhosas mais populares e amplamente consumidas em todo o mundo (Freitas *et al.*, 2017). No Brasil, seu cultivo consolidou-se inicialmente nas regiões Sul e Sudeste, mas, devido à crescente demanda por alimentos frescos e saudáveis, sua produção tem se expandido para outras regiões do país (Grangeiro *et al.*, 2011). Trata-se de uma cultura de grande importância econômica para a olericultura, sobretudo em sistemas intensivos e de agricultura familiar, nos quais a eficiência produtiva é determinante para a rentabilidade (Guimarães *et al.*, 2020).

Suas folhas apresentam elevado valor nutricional, sendo ricas em vitaminas A e C, além de minerais como cálcio e ferro, caracterizando-se por rápido desenvolvimento vegetativo e ciclo curto, geralmente entre 45 e 50 dias (Freitas *et al.*, 2017). Essas características tornam a rúcula altamente responsiva à disponibilidade de nutrientes no solo, exigindo manejo nutricional criterioso (Wang *et al.*, 2024). Nesse sentido, o fornecimento adequado de nitrogênio é essencial para o crescimento vegetativo, acúmulo de biomassa e qualidade das folhas, uma vez que esse nutriente está diretamente relacionado à síntese de proteínas e à atividade fotossintética (Taiz *et al.*, 2021). Assim, o manejo correto da adubação é imprescindível para a obtenção de elevada produtividade e qualidade, sendo que desequilíbrios nutricionais podem comprometer irreversivelmente o desempenho da cultura devido ao seu curto ciclo (Cecílio Filho *et al.*, 2014).

O uso de fertilizantes minerais convencionais tem sido a prática padrão na agricultura moderna para promover o crescimento das plantas. No entanto, o Brasil possui grande dependência do uso de fertilizantes para produção agrícola, sendo responsável por cerca de 8,5% do consumo global de fertilizantes, visto que os solos tropicais apresentam baixa fertilidade natural. Porém, o elevado nível de importação em um setor concentrado comercial e geograficamente deixa a economia brasileira vulnerável às oscilações do mercado internacional de fertilizantes (Caligares, *et al.*, 2022). Além disso, este setor vem sendo acometido por uma série de turbulências, levando a altas sucessivas nos preços (Osaki, 2022), sendo que a participação dos fertilizantes nos custos da produção compromete grande parte dos custos variáveis (Conab, 2022).

Desta forma, estas preocupações levaram a um crescente interesse na busca por alternativas de fontes de fertilizantes mais sustentáveis para o setor. Entre essas alternativas, o uso de fertilizantes orgânicos, como o "frass" de insetos pode ser uma opção. O frass é um termo que descreve as excretas das criações de insetos, e pode ser aproveitado como um fertilizante orgânico, já que apresenta nutrientes como nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e micronutrientes (Poveda, 2021), essenciais para o desenvolvimento e manutenção das plantas (Marschner, 2012).

Dentre os insetos utilizados, destacam-se os tenébrios, conhecidos como larvas de farinha, cuja produção tem crescido significativamente devido ao seu uso na alimentação animal e potencial aplicação na agricultura. Estudos demonstram que o uso de frass pode promover efeitos positivos no crescimento e desenvolvimento de plantas. KHAN *et al.* (2016) observaram que o frass de larvas de Cerambycidae favoreceu a germinação e o crescimento inicial de mudas de alface. Da mesma forma, Kagata e Ohgushi (2012) verificaram aumento na disponibilidade de nitrogênio no solo e incremento no crescimento de plantas de repolho com a aplicação de frass de insetos. Além disso, pesquisas recentes indicam que o frass pode atuar não apenas como fonte de nutrientes, mas também como condicionador do solo, melhorando sua estrutura e promovendo maior retenção de água (Barragán-Fonseca *et al.*, 2022).

Maximizar a eficiência do uso de nutrientes dentro de um sistema de produção é a chave para reduzir o consumo de fertilizantes, que são caros, tanto em termos econômicos e ambientais (Felicity *et al.*, 2014). O uso racional de fertilizantes é uma das premissas necessárias para o sucesso da produção (Heinrichs *et al.* 2008), desta forma o uso de novas tecnologias em fertilizantes que possam melhorar a eficiência e o aproveitamento dos nutrientes pelas plantas é fundamental para se obter altas produtividades na cultura da rúcula com sustentabilidade econômica e ambiental.

Portanto, a adoção de tecnologias que promovam maior eficiência no uso de nutrientes, como o aproveitamento de resíduos orgânicos provenientes da criação de insetos, representa uma estratégia promissora para a produção de hortaliças. No caso da rúcula, cultura de ciclo curto e elevada exigência nutricional, o uso de fertilizantes alternativos como o frass pode contribuir para a redução de custos, melhoria da qualidade do solo e aumento da sustentabilidade dos sistemas produtivos, sem comprometer o desempenho agronômico da cultura.

Neste sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar o potencial do resíduo gerado na produção massal de tenébrios (frass de tenébrios), como uma alternativa viável na adubação de mudas de rúcula (*Eruca sativa* Miller), comparando seu desempenho com o do fertilizante convencional.

2 METODOLOGIA

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação na Fazenda Escola do Centro Universitário Fundação de Ensino Octávio Bastos (UNIFEOB), na cidade de São João da Boa Vista- SP.

A cultura estudada foi a rúcula (*Eruca sativa* Miller), conduzida em vasos de 3,5 litros, com Neossolo Quartzarênico.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado (DIC) com 5 (cinco) tratamentos e 5 (cinco) repetições, totalizando vinte e cinco parcelas experimentais. Cada parcela continha 2 (duas) plantas de rúcula.

Os tratamentos estudados foram T1: Sem adubação convencional e sem aplicação de fress; T2: 15g do fertilizante mineral 04-14-08 (adubação completa); T3: 7,5g do fertilizante mineral 04-14-08 (50% da adubação completa); T4: 15g do frass de tenébrios; e T5: 7,5g de frass do tenébrios.

As sementes de rúcula foram semeadas em bandejas plásticas com areia e, posteriormente, foram transferidas 2 (duas) mudas para os vasos e mantidas em condição de casa de vegetação, irrigadas pelo sistema de aspersão, durante uma hora e meia, três vezes ao dia.

Após o transplantio das mudas, foi aplicado o respectivo tratamento em cada vaso. Para a adubação da rúcula foram utilizados no estudo o fertilizante mineral 04-14-08 e o fertilizante orgânico frass de tenébrios (*Zophobas morio* Coleoptera: Tenebrionidae).

O resíduo da criação de tenébrios (frass) utilizado foi obtido da criação experimental de tenébrios da empresa Pangea Foods. A criação larvas de *Zophobas morio* (Coleoptera: Tenebrionidae) é mantida em dieta para aves e vegetais como fonte de umidade. O material utilizado foi separado em caixas plásticas para posteriormente ser utilizado como fertilizante. A análise química do material está indicada na Tabela 1.

Tabela 1 –Análise química do material orgânico utilizado no experimento.

Identificação	pH	Umidade	MS Total	Cinza	C Total	C org	N	P_2O_5	K_2O	S	CaO	MgO	Cu	Fe	Mn	Zn
Fress de		%					g/kg						mg/kg			
tenébrios	8,1	18,3	81,7	7,5	53,3	20,2	61	10,6	3	1	60,4	10,2	37,5	1222	243	29,5

Fonte: Autores, 2026.

Os substratos (terra + fertilizante) foram preparados através da homogeneização manual com o fertilizante orgânico do frass de tenóbrios e com adubo mineral 04-14-08, e colocados em vasos.

Após 42 dias do transplantio, foram avaliados: número de folhas por planta, largura (cm) e comprimento das folhas (cm), bem como o peso verde (g) e o peso seco (g) das plantas.

Os dados obtidos para cada uma das variáveis foram submetidos à análise de variância pelo teste F e as médias foram comparadas por meio do teste de Tukey a 5% de significância. A realização da ANOVA e seus desdobramentos foram realizadas através do software estatístico AgroEstat – sistema para análises estatísticas de ensaios agronômicos (Barbosa; Maldonado Júnior, 2015).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do estudo revelaram diferenças significativas nos parâmetros biométricos entre os tratamentos (Tabela 2). O tratamento com 15g de adubo mineral (T2) apresentou o maior número de folhas, maior massa fresca e seca, maior altura e largura de folha, com isso pode se observar que o tratamento 2 foi o que melhor se desenvolveu e que já era esperado por se tratar de um produto já presente no mercado.

Tabela 2 – Avaliação dos parâmetros: número de folhas, número de folhas por planta, peso fresco (g), peso seco (g), altura (cm) e largura (cm) das folhas após adubação com frass e fertilizante.

Tratamentos	**Número de folhas**	**Folhas/ planta**	**Massa fresca (g)**	**Massa seca (g)**	**Altura (cm)**	**Largura (cm)**
04-14-08 15g	37,00 a	7,35	16,82 a	1,90 a	52,01	21,93
04-14-08 7,5g	28,00 ab	6,88	9,47 ab	0,98 ab	42,4	17,47
Frass 15g	25,80 ab	6,36	11,86 ab	1,12 ab	37,58	16,65
Frass 7,5g	28,40 ab	7,33	11,12 ab	1,16 ab	44,77	17,59
Testemunha	9,80 b	4,25	1,90 b	0,20 b	26,43	11,21
F	4,12*	$2,06^{ns}$	3,64*	4,12*	$1,95^{ns}$	$2,17^{ns}$
DMS (5%)	16,77	6,26	13,87	4,28	20,58	10,81
CV	30,41%	23,17%	43,65%	42,78%	28,10%	24,14%

Nota: *significativo a 5%, **significativo a 1% e ^{NS} não significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F; médias transformadas por arc sen $\sqrt{x}/100$. Médias seguidas por letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Fonte: Autores, 2026.

O tratamento com 7,5g de adubo mineral (T3) também mostrou resultados positivos, embora em menor escala que a dose completa. Uso de frass (T4 e T5) na adubação de rúcula promoveram resultados intermediários, mas positivos com um número de folhas e massa fresca significativamente comparáveis com a dose de 7,5 g do adubo mineral. Este estudo indica que o frass pode ser uma fonte significativa de adubação, com resultados comparáveis aos do adubo mineral em alguns parâmetros.

Fato semelhante ao estudo foi observado na cultura da alface (*Lactuca sativa*) Menezes Junior *et al.* (2000) observou diferentes fontes de substratos no desenvolvimento de mudas de alface. Relataram que porcentagens mais altas de composto orgânico em substratos para produção de alface reduziram drasticamente a germinação de mudas dessa hortaliça. A quantidade elevada de sais solúveis presentes em compostos orgânicos pode reduzir a emergência da muda, deste modo é necessário encontrar a dose correta para a diluição para que não prejudique sua germinação. Ao escolher o frass como fonte de adubação, calculamos 250kg/ha e chegamos ao resultado de 0,43g/vaso. Para padronizar duas doses escolhemos 15g (8,6t/ha) e 7,5g (4,3t/ha). Assim evitamos que a muda seja prejudicada por adubo em excesso.

Outro trabalho, desenvolvido por Medeiros *et al.* (2008), foi observado que as mudas de alface cresceram mais em substratos produzidos com compostos orgânicos que mudas produzidas em substrato de adubo comercial. O experimento proporcionou maior altura da parte aérea, houve também efeito significativo da interação cultivar e substrato para a massa seca da parte aérea. Na Tabela 2, é possível comparar a altura e largura dos tratamentos 2 e 5, onde as mudas de rúcula se desenvolveram muito bem com o frass.

Os tratamentos apresentaram diferenças significativas, sugerindo que a escolha da fonte de adubação tem um impacto mensurável no desenvolvimento da cultura. O tratamento com 15g de adubo mineral 04-14-08 mostrou ser o mais eficaz em termos de número de folhas, massa fresca e massa seca, altura e largura das folhas, um resultado esperado por se tratar de um produto que já está no mercado. No entanto, o tratamento com frass não ficou muito atrás, demonstrando seu potencial como uma alternativa viável.

Os tratamentos com frass não apenas promoveram o crescimento da rúcula, mas também indicaram a possibilidade de substituição parcial do adubo mineral. Os resultados deste estudo mostram que 7,5g de frass produziram resultados comparáveis ao tratamento com 15g de adubo mineral 4-14-8 em várias métricas, incluindo número de folhas, massa fresca e seca. Isso sugere que o frass pode ser uma alternativa sustentável aos fertilizantes minerais, reduzindo potencialmente os impactos ambientais negativos associados a eles.

Segundo Allam *et al.* (2022), a adubação orgânica não só incrementa a produtividade, mas também proporciona a obtenção de plantas com características qualitativas distintas das cultivadas exclusivamente com adubos minerais. Nesse sentido, as altas produtividades alcançadas pelo uso de adubos químicos e agrotóxicos têm sido questionada, principalmente, por omitir aspectos qualitativos importantes para a produção vegetal.

Em comparação com esses trabalhos desenvolvidos podemos observar que a dose utilizada do Frass foi ideal para a cultura da rúcula, onde ela apresentou um bom crescimento e desenvolvimento. A qualidade comercial da rúcula está diretamente relacionada às características morfológicas e ao acúmulo de biomassa foliar, sendo parâmetros como massa fresca e desenvolvimento das folhas amplamente utilizados para avaliação do padrão de mercado. Nesse sentido, os resultados obtidos no tratamento T4 (15 g de frass) apresentaram valores médios de massa por folha (11,86 g) próximos aos padrões comerciais relatados na literatura, indicando desempenho compatível com a produção convencional. Esses resultados reforçam o potencial do frass como alternativa viável de fertilizante orgânico para a cultura (Gomes *et al.*, 2021).

O uso contínuo e desbalanceado de fertilizantes minerais pode alterar a atividade biológica do solo e sua diversidade microbiana, especialmente quando não associado à adição de matéria orgânica, podendo impactar a qualidade do solo e, consequentemente, o desempenho das culturas (Geisseler; Scow, 2014).

4 CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo indicam que o frass é uma alternativa promissora ao adubo mineral na cultura da rúcula. Sua capacidade de promover o crescimento da planta sugere que ele pode desempenhar um papel significativo na busca por práticas agrícolas mais sustentáveis e eficazes. Experimentos adicionais e pesquisas futuras são necessários para aprimorar nosso entendimento dessas alternativas e seu impacto em diferentes contextos agrícolas.

REFERÊNCIAS

ALLAM, M.; RADICETTI, E.; QUINTARELLI, V.; PETROSELLI, V.; MARINARI, S.; MANCINELLI, R. Influence of organic and mineral fertilizers on soil organic carbon and crop productivity under different tillage systems: A meta-analysis. **Agriculture**, v. 12, n. 4, p. 464, 2022. https://doi.org/10.3390/agriculture12040464

BARRAGÁN-FONSECA, K. B.; DICKERSON, C. W.; VAN HUIS, A. Insect frass as a soil amendment: A review of its agronomic potential. **Journal of Insects as Food and Feed**, v. 8, n. 4, p.1–14, 2022. https://doi.org/10.3920/JIFF2021.0130

BARBOSA, J. C.; MALDONADO JÚNIOR, W. **Experimentação agronômica & AgroEstat: Sistema para análises estatísticas de ensaios agronômicos.** FCAV/UNESP, 2015.

CALIGARIS, B. S. A.; RANGEL, L. E. P.; POLIDORO, J. C.; FARIAS, P. I. V. A importância do Plano Nacional de Fertilizantes para o futuro do agronegócio e do Brasil. **Revista de Política Agrícola**, v. 31, n. 1, 2022.

CECÍLIO FILHO, A. B.; MAIA, M. M.; MENDOZA-CORTEZ, J. W.; RODRIGUES, M. A.; NOWAKI, R. H. D. Épocas de cultivo e parcelamento da adubação nitrogenada para rúcula. **Comunicata Scientiae**, v. 5, n. 3, p.252–258, 2014.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento (2022). **Custos de produção agrícola: A metodologia da Conab.** CONAB, 2022. https://www.conab.gov.br. Acesso em 29 de janeiro de 2026.

FELICITY, V.; CROTTY, F. Y.; FYCHAN, R.; THEOBALD, V. J.; SANDERSON, R.; CHADWICK, D. R.; MARLEY, C. L. The impact of using alternative forages on the nutrient value within slurry and its implications for forage productivity in agricultural systems. **PLoS ONE**, v. 9. 2014. https://doi.org/10.1371/journal.pone.010xxxx

FREITAS, E. M. D.; GIOVANELLI, L. B.; DELAZARI, F. T.; SANTOS, M. L. D.; PEREIRA, S. B.; SILVA, D. J. Arugula production as a function of irrigation depths and potassium fertilization. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, p.197–202, 2017.

GEISSELER, D.; SCOW, K. M. Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms: A review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 75, p. 54–63, 2014. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.03.023

GOMES, M. C.; SOUZA, M. E. L.; ALVES, A. U.; LIMA, E. A.; HEBERLE, E.; CARDOSO, E. A. Desempenho agronômico de rúcula adubada com vinhaça em diferentes sistemas de cultivo. **Revista Cultura Agronômica**, v. 30, n. 2, p. 93–108, 2021. https://doi.org/10.32929/2446-8355.2021v30n2p93-108

GRANGEIRO, L. C.; OLIVEIRA, F. C. L.; NEGREIROS, M. Z.; MARROCOS, S. T. P.; LUCENA, R. R.; OLIVEIRA, R. A. Crescimento e acúmulo de nutrientes em coentro e rúcula. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 1, p. 11–16, 2011.

GUIMARÃES, M. A.; LIMA NETO, B. P.; LEMOS NETO, H. S.; HENDGES, A. R. A.; VIANA, C. S.; RABELO, J. S. Agronomic performance of arugula/nira intercropping in different cultivation arrangements. **Horticultura Brasileira**, v. 38, n. 3, p. 329–333, 2020. https://doi.org/10.1590/S0102-053620200315

HEINRICHS, R.; MOREIRA, A.; FIGUEIREDO, P. A. M.; MALAVOLTA, E. Atributos químicos do solo e produção do feijoeiro com a aplicação de calcário e manganês. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 1157–1164, 2008.

KAGATA, H.; OHGUSHI, T. Positive and negative impacts of insect frass quality on soil nitrogen availability and plant growth. **Population Ecology**, v. 54, p. 75–82, 2012. https://doi.org/10.1007/s10144-011-0285-9

KHAN, D.; GHANI, A.; RAHMAN, A.; SHAH, A.; KHAN, S. Frass of saproxylic cerambycid larvae from dead twigs of *Acacia stenophylla* and its effects on germination and seedling growth of *Lactuca sativa*. **International Journal of Biology and Biotechnology**, v. 13, p. 461–470, 2016.

MARSCHNER, H. (2012). *Mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Elsevier.
MEDEIROS, D. C.; FREITAS, K. C. S.; VERAS, F. S.; ANJOS, R. S.; BORGES, R. D.; CAVALCANTE NETO, J. G. Qualidade de mudas de alface em função de substratos com e sem biofertilizante. **Horticultura Brasileira**, v. 26, p.186–189, 2008.

MENEZES JÚNIOR, F. O. G.; FERNANDES, H. S.; MAZARO, S. M.; MARINI, D. Caracterização de diferentes substratos e seu desempenho na produção de mudas de alface em ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, v. 18, n. 3, p.164–170, 2000.

OSAKI, M. **Gasto médio com fertilizantes para produção de grãos dobra em um ano**. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA), 2022. https://www.cepea.esalq.usp.br

POVEDA, J. Insect frass in the development of sustainable agriculture: A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 41, n. 5, 2021. https://doi.org/10.1007/s13593-020-00656-x

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal** (7th ed.). Artmed Editora, 2021.

WANG, L.; ZHOU, H.; FEI, C. Substituting partial chemical nitrogen fertilizers with organic fertilizers maintains grain yield and increases nitrogen use efficiency in maize. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p.1442123, 2024. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1442123

CAPÍTULO 6

ÍNDICES NUTRICIONAIS DE HÍBRIDOS DE MILHO SOB DIFERENTES NÍVEIS DE ADUBAÇÃO POTÁSSICA A CAMPO

Ronilson Martins Silva
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo, Brasil

João Paulo Bernardi Ferreira
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo, Brasil

Arissa Maeshiro
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo, Brasil

Marcos Vinícius Proença de Oliveira
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Brasil

Liliane Maria Romualdo Altão
Centro Universitário Octávio Bastos/ UNIFEOB, Brasil

Fernanda de Fátima da Silva Devechio
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo, Brasil

DOI: 10.52832/wed.221.1303

Resumo: A fertilidade do solo é um dos principais fatores que influenciam diretamente a produtividade nas áreas de cultivo. O objetivo do trabalho foi verificar índices nutricionais de híbridos de milho, cultivados em campo com dosagens crescentes de potássio. O experimento que foi delineado em blocos com quatro doses de adubação de potássica e três híbridos de milho. Foi avaliada a produtividade de grãos e foi demonstrada a concentração de K nas plantas para calcular a eficiência de uso (EUK), recuperação (ERK) e eficiência interna de K (EIK). Os resultados indicaram que a aplicação de 260 kg ha^{-1} de K_2O proporcionou as maiores EUK, ERK e EIK. O híbrido Pioneer 30F35® (H2) foi o mais eficiente em uso de K com 260 kg ha^{-1} de K_2O, enquanto o híbrido Syngenta Status® (H3) se destacou na dose de 130 kg ha^{-1}. Na ERK, o híbrido DKB 390 PróR2® (H1) teve melhor desempenho com a maior dose, evidenciando maior capacidade de recuperação do K aplicado. Estes dados sugerem que doses elevadas de K beneficiam principalmente o H2 em termos de produção de grãos, enquanto doses recomendadas favorecem o H3.

Palavras-chave: Fertilidade do solo. Macronutrientes. Produtividade. *Zea mays* L.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a atividade agrícola tem sofrido profundas modificações em razão do aumento do custo de produção, com reflexos diretos na rentabilidade das culturas, especialmente em sistemas de produção de grãos como o milho (FAO, 2022). Em sistemas mais tecnificados, os gastos com correção do solo e adubação representam, em média, 40 a 45% do custo total de produção, evidenciando a importância do manejo nutricional adequado (Wang *et al.*, 2024). Nesse contexto, a adubação é reconhecida como um dos fatores que mais afetam a produtividade e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, sendo que o consumo de fertilizantes na cultura do milho tem aumentado significativamente no Brasil, impulsionado pelo incremento da produtividade por unidade de área (Bashagaluke *et al.*, 2019).

As limitações ambientais impostas à agricultura moderna exigem que o manejo da adubação seja ajustado às exigências nutricionais das culturas, considerando o rendimento esperado e as condições edafoclimáticas (Fixen *et al.*, 2021). Para o estabelecimento de um programa adequado de fertilização, é fundamental identificar os principais fatores limitantes à nutrição vegetal, bem como determinar quais nutrientes são deficientes, suas quantidades, épocas e formas de aplicação mais eficientes (Raij *et al.*, 2022).

A adoção de práticas de manejo mais eficientes na aplicação de fertilizantes pode favorecer tanto o aumento da produtividade quanto a redução dos custos de produção. Nos últimos anos, a pesquisa tem se voltado para a identificação de mecanismos que promovam maior eficiência no uso de nutrientes, impulsionada pela necessidade de uma agricultura mais sustentável, com menor consumo energético e menor impacto ambiental (Baligar *et al.*, 2022).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Importância da fertilidade do solo e do potássio na cultura do milho

A fertilidade do solo constitui um dos principais fatores determinantes da produtividade agrícola, especialmente em sistemas intensivos de produção de grãos, sendo que o potássio (K) destaca-se por exercer funções fundamentais na fisiologia vegetal, incluindo regulação osmótica, ativação enzimática, fotossíntese e transporte de fotoassimilados (Marschner, 2022).

Na cultura do milho (*Zea mays L.*), o K é um dos nutrientes mais exigidos, sendo responsável por melhorias na qualidade dos grãos, no enchimento de espigas e na tolerância a estresses abióticos (Taiz *et al.*, 2021). Estudos recentes demonstram que a adequada disponibilidade de K no solo está diretamente relacionada ao incremento da produtividade e à eficiência no uso de outros nutrientes (Oliveira *et al.*, 2022; IPNI, 2021).

Além disso, o K desempenha papel crucial na manutenção do equilíbrio iônico e hídrico das plantas, contribuindo para maior resistência a condições adversas, como déficit hídrico e altas temperaturas, fatores cada vez mais frequentes em sistemas agrícolas tropicais (Fageria *et al.*, 2021).

2.2 Resposta do milho à adubação potássica

A resposta do milho à adubação potássica depende de diversos fatores, como teor inicial de K no solo, textura, sistema de manejo e híbrido cultivado. Em solos com baixos teores disponíveis, a aplicação de potássio promove aumentos significativos na produtividade, enquanto em solos com níveis adequados, a resposta pode ser limitada devido ao efeito residual do nutriente (Raij *et al.*, 2022).

Pesquisas recentes indicam que doses crescentes de K tendem a promover incrementos lineares ou quadráticos na produtividade e nos teores foliares de nutrientes, evidenciando a importância do manejo adequado da adubação (Oliveira *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2023).

Além disso, estratégias como parcelamento ou antecipação da adubação têm sido estudadas como alternativas para melhorar a disponibilidade do nutriente ao longo do ciclo da cultura, aumentando a absorção e reduzindo perdas por lixiviação (Fixen *et al.*, 2021; FAO, 2022).

2.3 Eficiência de uso potássio

A eficiência de uso de nutrientes tem sido amplamente estudada como indicador da sustentabilidade dos sistemas agrícolas. No caso do K, destacam-se três principais índices: eficiência de uso (EUK), eficiência de recuperação (ERK) e eficiência interna (EIK), que permitem avaliar o desempenho nutricional das plantas (Fageria *et al.*, 2021; Baligar *et al.*, 2022).

A EUK está relacionada à capacidade da planta em converter o nutriente absorvido em produção de biomassa ou grãos. Já a ERK expressa a fração do nutriente aplicado que é efetivamente absorvida pela planta, enquanto a EIK indica a eficiência fisiológica do nutriente dentro do metabolismo vegetal (Marschner, 2022; Taiz *et al.*, 2021).

Estudos recentes apontam que a eficiência do uso de K pode variar significativamente em função das doses aplicadas e das condições ambientais, o que reforça a necessidade de manejo adequado da fertilização (Liu *et al.*, 2023).

2.4 Variabilidade entre híbridos de milho

A resposta à adubação potássica também está diretamente relacionada ao material genético utilizado. Diferentes híbridos de milho apresentam variações na capacidade de absorção, translocação e utilização de nutrientes, o que influencia diretamente os índices nutricionais e a produtividade (Ciampitti; Vyn, 2021).

Pesquisas indicam que determinados híbridos possuem maior eficiência no uso de K, sendo capazes de manter altos níveis produtivos mesmo sob doses moderadas do nutriente. Essa variabilidade genética está associada a características fisiológicas, como arquitetura radicular e eficiência metabólica (Fageria *et al.*, 2021).

Além disso, estudos demonstram que a interação entre genótipo e ambiente pode alterar significativamente a resposta à adubação, evidenciando a necessidade de recomendações específicas para cada híbrido e condição de cultivo (FAO, 2022).

2.5 Sustentabilidade e manejo da adubação potássica

A intensificação da agricultura tem aumentado a demanda por fertilizantes, tornando essencial a busca por estratégias que promovam maior eficiência no uso de nutrientes (FAO, 2022). O manejo adequado da adubação potássica contribui não apenas para o aumento da produtividade, mas também para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Fixen *et al.*, 2021).

A utilização de práticas como agricultura de precisão, uso de bioinsumos e seleção de híbridos mais eficientes tem se mostrado promissora para reduzir perdas e aumentar a eficiência nutricional (Liu *et al.*, 2023).

Nesse sentido, a avaliação de índices nutricionais em híbridos de milho submetidos a diferentes níveis de adubação potássica é fundamental para o desenvolvimento de recomendações mais eficientes e sustentáveis, contribuindo para o uso racional de fertilizantes (Fageria *et al.*, 2021). Desta forma, o objetivo deste trabalho foi verificar os índices nutricionais de híbridos de milho (*Zea mays* L.) cultivados a campo com aplicação de doses crescentes de adubação potássica.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização da área experimental e cultura estudada

A cultura estudada foi o milho (*Zea mays* L.), conduzido a campo na FZEA/USP, em área de baixa fertilidade, em um Neossolo Quartzarênico (RT) classificado de acordo com a EMBRAPA (2013), temperatura média igual a 21,6 C e precipitação acumulada do período experimental de 896,4mm. As características químicas do solo da área experimental estão na Tabela 1.

Tabela 1 – Análise química do solo da área experimental na camada de 0,0 a 0,20m.

pH	P (res)	S	K	Ca	Mg	Al	H+Al	M.O	SB	CTC	V	m	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg/dm³			mmolc/dm³				g/kg	$mmol_c/dm^3$		%		mg/dm³				
5,1	6	6	0,4	12	7	1	22	21	19	41	47	3	0,4	4,6	6	7,6	0,8

Fonte: Autores, 2026.

O solo apresentava 86,0 e 90,0 g kg^{-1} de argila e 888 e 877 g kg^{-1} de areia respectivamente nas camadas de 0-0,2m e 0,2-0,4m.

3.2 Delineamento Experimental

O delineamento experimental foi em blocos casualizados (DBC) em esquema fatorial 4x3 (quatro doses de nutrientes e três híbridos de milho), em 4 (quatro) blocos, totalizando 48 parcelas por experimento. Cada parcela apresentava 6 (seis) linhas de 6 metros (m) cada linha e espaçamento de 0,8m nas entrelinhas, resultando numa área útil de 28,8m² por parcela.

Os tratamentos constaram de 3 (três) híbridos de milho: DKB 390 PróR2® (H1), Pioneer 30F35® (H2) e Syngenta Status® (H3) e 4 (quatro) doses de adubação: D1 = omissão completa do elemento, D2 = 50% da dose recomendada, D3 = 100% da dose recomendada (dose completa) e D4 = 200% da dose recomendada (dose excedente). Essas doses de nutrientes corresponderam respectivamente a 0, 65, 130 e 260 kg ha^{-1} de K_2O. Os demais macronutrientes foram aplicados nas concentrações recomendadas, além de 2 kg ha^{-1} Zn no plantio.

As adubações de semeadura e cobertura para cada nutriente foram estabelecidas com base na análise inicial do solo e de acordo com a recomendação de Cantarella *et al.* (2022) para a cultura do milho para uma produtividade esperada de 10-12 toneladas por hectare. As fontes de nutrientes utilizadas foram ureia protegida (45% de N), cloreto de potássio – KCl (60% de K_2O) e superfosfato simples (18% de P_2O_5).

3.3 Avaliações

Todas as amostras moídas foram colocadas em sacos plásticos identificados e encaminhadas em sacos plásticos identificados e encaminhadas ao laboratório para determinação da concentração de potássio (K), segundo métodos descritos por Bataglia *et al.* (1983).

As amostras foram digeridas por via úmida com ácido sulfúrico para análise de N, e com ácido nítrico-perclórico para análise de K. A concentração de N foi determinada através de destilação de amônia em destilador, seguido de titulação. A concentração de K por fotometria de chama.

3.4 Produtividade de grãos

Ao final do ciclo da cultura, foi avaliada a produtividade do milho, coletando todas as espigas dentro de 2 linhas de plantas espaçadas de 0,8 m e 4 m de comprimento, perfazendo área total de 6,4 m^2. Após a colheita, as espigas foram secas ao ar para posterior despalha e debulha. A produtividade de grãos dos híbridos de milho foi ajustada para 13% de umidade e posteriormente para produtividade em toneladas por hectare (t ha^{-1}).

3.5 Índices nutricionais de K

Em função dos resultados de produtividade de grãos e de concentração de K foliar, foram calculadas:

Eficiência de uso de potássio (EUK) em milho: calculada como a razão entre o incremento no rendimento de grãos (Pr) fertilizado com 130 ou 260 kg ha^{-1} de K_2O (fert) e não fertilizado – 0 kg ha^{-1} de K (não fert) para a adubação potássica aplicada (Cassman *et al.*, 2003). A seguinte equação foi utilizada para o cálculo EUK:

$$\mathrm{EUK} = \frac{(\mathrm{Pr\ fert} - \mathrm{Pr\ naofert})}{\mathrm{K20aplicado}}$$

onde Pr fert é o rendimento de grãos, em kg ha^{-1}, a 13% de umidade. Pr naofert é o rendimento de grãos que não recebeu K_2O na adubação. Para esse estudo, Pr fert – Pr naofert foram utilizados as doses de aplicação 0 e 130 kg ha^{-1} de K_2O e 0 e 260 kg ha^{-1} de K_2O.

Eficiência de recuperação de K (ERK): Seguindo o mesmo raciocínio do cálculo da EUK, a ERK foi calculada como:

$$\mathrm{ERK} = \frac{(\mathrm{KFfert} - \mathrm{KFnaofert})}{\mathrm{Kaplicado}}$$

onde KFfert é o de K foliar, em g kg^{-1}, das amostras de plantas adubadas com 130 e 260 kg ha^{-1} de K_2O, e KFnaofert é o de K foliar correspondente das amostras de plantas que não receberam fertilizante potássico.

Eficiência interna de K (EIK): foi calculada como:

$$EIK = \frac{(Pr\ fert - Pr\ naofert)}{(KFfert - KFnaofert)}$$

3.6 Forma de análise dos resultados

O delineamento experimental foi em blocos casualizados em esquema fatorial 4x3 (quatro doses de nutrientes e três híbridos de milho), em quatro blocos. O modelo matemático indicado foi o seguinte:

Yijk = m + Hi + Nj + HNij + Wk + eijk

onde,

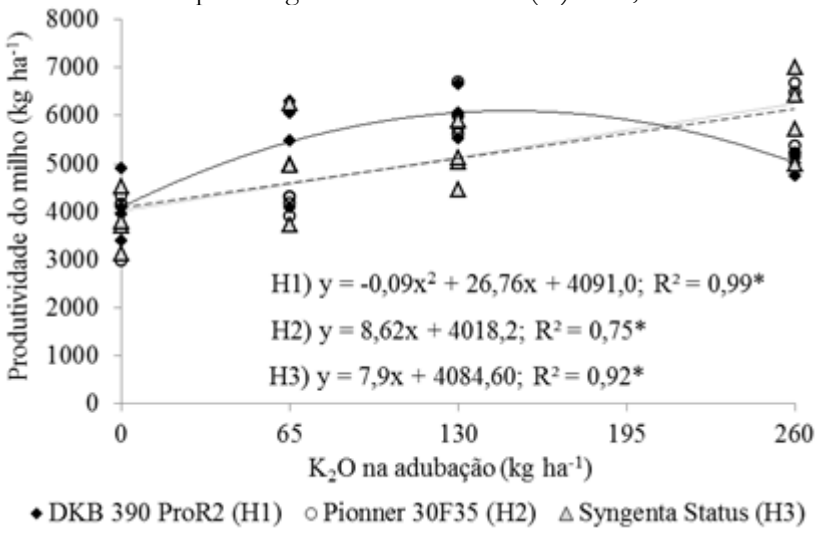
Yijk é o valor observado na parcela que recebeu os tratamentos ij que se encontram no bloco k;
m é a média geral do experimento;
Hi é o efeito dos híbridos de milho;
Ni é o efeito das doses de nutrientes aplicados na parcela;
Wk é o efeito devido ao bloco k em que se encontra a parcela;
eijk é o efeito dos fatores não controlados na parcela que recebeu os tratamentos ij no bloco k.

Nos casos em que o teste F foi significativo somente para Nj, foi realizada uma única análise de regressão para todos os híbridos. Nos casos em que o teste F foi significativo para NHij, ou seja, se houve interação entre os híbridos estudados e as doses de nutrientes aplicadas, o desdobramento visou estudar as doses dentro do Hi. Neste caso, foram realizadas três análises de regressão, sendo uma para cada híbrido e foram avaliadas através da significância dos coeficientes de regressão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A adição de fertilizante potássico na adubação promoveu aumentos significativos ($p<0,01$) na produtividade dos híbridos de milho que responderam segundo modelos quadráticos para H1, H2 e H3 (Figura 1). Esses resultados concordam com os encontrados em vários trabalhos da literatura (Clover; Mallarino, 2013; Wu *et al.*, 2013) estudando a resposta de produtividade do milho à adição de doses de adubação potássica. Fan *et al.* (2020) também observaram que o rendimento de grãos de milho foi correlacionado positivamente com o aumento da concentração de K no solo. Os híbridos de milho também diferiram significativamente ($p<0.05$) para este parâmetro, concordando com resultados encontrados por Akram (2013).

Figura 1 – Produtividade de grãos (kg ha^{-1}) de 3 híbridos de milho cultivados com doses de K_2O no campo. **Significativo a 5%. CV (%) = 13,2.



Fonte: Autores, 2026.

O aumento da produtividade do milho devido à adubação potássica, (diferença entre a produtividade máxima e a obtida com a omissão completa de K na adubação) em média foi de 2,0; 2,1 e 2,2 t ha^{-1}, respectivamente para H1, H2 e H3.

A produtividade máxima de H1 foi de 6080 kg ha-1 na dose de 148.7 kg ha-1 de K_2O. Esses resultados concordam com os encontrados por Wu *et al.* (2013) que, estudando a aplicação de doses de K em híbridos de milho, verificaram altas respostas na produtividade do milho para a aplicação do K.

Segundo Wang *et al.* (2024) o tamanho da espiga não é tão afetado pela deficiência de K no milho, mas há um comprometimento na produção, pois as extremidades dos grãos não se desenvolvem e as espigas ficam com os grãos não compactamente enfileirados no sabugo.

Akram (2013) afirma que a produção de grãos é o resultado final de muitos processos complexos morfológicos e fisiológicos que ocorrem durante o crescimento e desenvolvimento da cultura.

A partir dos resultados de produtividade de grãos e K foliar dos híbridos de milho em função de doses de K_2O na adubação, pode-se observar a eficiência de uso (EUK), de recuperação (ERK) e interna (EIK) do nutriente aplicado em cada híbrido estudado (Tabela 2).

Tabela 2 – Eficiência de uso de K (EUK), eficiência de recuperação de K (ERK) e eficiência interna de K (EIK) por ha em 3 (três) híbridos de milho, em função de 0 e 130 kg ha^{-1} de K_2O (130K) ou 0 e 260 kg ha^{-1} de K_2O (260K).

Híbrido	EUK (kg grãos. kg^{-1} K_2O aplicado)		ERK (g K foliar. kg^{-1} K_2O aplicado)		EIK (kg grãos. g^{-1} K foliar)	
	130K	260K	130K	260K	130K	260K
H1	3,6Bc	15,1Ab	0,04Aa	0,07Aa	99,4Bc	221,7Ac
H2	7,8Bb	16,3Aa	0,04Aa	0,05Ab	223,5Bb	311,0Aa
H3	8,6Ba	10,3Ac	0,03Aa	0,04Ab	313,8Aa	274,2Bb

Nota: Letras maiúsculas referem-se à comparação de tratamentos numa mesma dose de K e as letras minúsculas comparam médias dos híbridos de milho dentro do mesmo tratamento.
Fonte: Autores, 2026.

As EUK e EIK (Tabela 4.4.11) foram superiores quando foi aplicado o dobro da dose recomendada de K_2O (260K).

A maior EUK do estudo foi observada em H2 na dose 260 kg ha^{-1} de K_2O. Entretanto, quando a dose de K_2O foi reduzida para 130 kg ha^{-1}, o híbrido mais eficiente para o uso de K foi o H3. Portanto, pode-se dizer que o H2 é mais eficiente em converter o K_2O disponível no solo em produção de grãos dentro de um sistema de cultivo, quando a adubação potássica for realizada em doses elevadas (260K). Quando a aplicação de K_2O for realizada dentro da recomendada (130 K), o híbrido mais eficiente em converter o K_2O disponível no solo em produção de grãos foi o H3 (Tabela 2).

Fato similar pode ser observado com a EIK, em que na dose dobrada (260K) foi o H2 o mais eficiente, ou seja, produziu mais grãos de milho por unidade de K foliar. Por outro lado, quando a dose de K_2O foi de 130 kg ha^{-1}, a EIK foi superior no H3, mostrando nestas condições maior capacidade das plantas em transformar o K_2O absorvido pela cultura em grãos (Tabela 2).

O H1 atingiu a maior ERK na dose dobrada de K_2O (260K), o que indicou que este híbrido apresentou maior capacidade da planta em recuperar o K_2O do fertilizante potássico aplicado. Entretanto, na dose 130 kg ha^{-1} de K_2O, H1 e H2 apresentaram ERK similares e superiores ao H3 (Tabela 4.4.5).

4 CONCLUSÃO

Conclui-se que a eficiência do uso de potássio (K) em híbridos de milho varia de acordo com a dose de K aplicada e o híbrido. A dose elevada de K (260 kg ha^{-1}) favoreceu o H2, que mostra maior eficiência no uso e conversão do potássio na produção de grãos. Por outro lado, na dose recomendada (130 kg ha^{-1}), o H3 apresentou melhor desempenho, mostrando-se mais eficiente na conversão do K absorvido em produtividade. Assim, a escolha do híbrido e a dose de K devem ser ajustadas conforme as necessidades produtivas e a disponibilidade de nutrientes,

destacando a importância de práticas de manejo personalizadas para melhorar o rendimento agrícola em diferentes condições de cultivo.

Agradecimentos e financiamento

Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro recebido na forma de bolsa de estudo e de auxílio pesquisa.

REFERÊNCIAS

AKRAM, M. Effect of potassium nutrition on solute accumulation, ion composition and yield of maize hybrids grown under saline conditions. **Journal of Plant Nutrition***,* v. 36, n. 1*,* p. 143–163, 2013.

BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K.; HE, Z. L. Nutrient use efficiency in plants: An overview. **Communications in Soil Science and Plant Analysis***,* v. 53, 2022.

BASHAGALUKE, J. B.; LOGAH, V.; OPOKU, A.; TUFFOUR, H. O.; SARKODIE-ADDO, J.; QUANSAH, C. Soil loss and run-off characteristics under different soil amendments and cropping systems in the semi-deciduous forest zone of Ghana. **Soil Use and Management***, 35*(4), 617–629, 2019. https://doi.org/10.1111/sum.12531

BATAGLIA, O. A.; FURLANI, P. R.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, Â. M. C.; GALLO, J. R. **Métodos de análise química de plantas** (Boletim Técnico, 78). Instituto Agronômico de Campinas, 1983.

CANTARELLA, H.; MONTEZANO, Z. F.; VAN RAIJ, B. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. In B. VAN RAIJ, J. C. ANDRADE, H. CANTARELLA, & J. A. QUAGGIO (Eds.), **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes** (pp. 289–312). International Plant Nutrition Institute (IPNI Brasil), 2022.

CIAMPITTI, I. A.; VYN, T. J. Physiological perspectives of maize nutrient use efficiency. **Field Crops Research**, v. 269, p. 108124, 2021. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108124

CLOVER, M. W.; MALLARINO, A. P. Corn and soybean tissue potassium content responses to potassium fertilization and relationships with grain yield. **Soil Science Society of America Journal***,* v. 77, n. 2, p. 630–642, 2013. https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0223

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). **Milho: Cultivares para 2022/2023**. Embrapa Milho e Sorgo. 2013. http://www.cnpms.embrapa.br/milho/cultivares/index.php

FAGERIA, N. K.; MOREIRA, A.; MORAES, L. A. C. Nutrient use efficiency in crop production. **Journal of Plant Nutrition***,* v. 44, 2021. https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1871748

FAN, Y.; WANG, Z.; LIAO, D.; RAZA, M. A.; WANG, B.; ZHANG, J.; CHEN, J.; FENG, L.; WU, X.; LIU, C.; YANG, W.; YANG, F. Uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium as related to yield advantage in maize-soybean intercropping under different row

configurations. **Scientific Reports**, v. 10, p. 9504, 2020. https://doi.org/10.1038/s41598-020-66459-y

FAO – Food and Agriculture Organization. **Fertilizer use by crop in Brazil**. FAO. https://www.fao.org. Acesso em 10 de abril de 2026. 2022.

FIXEN, P. E.; BRUULSEMA, T. W.; JENSEN, T. L.; MIKKELSEN, R. L. The 4R nutrient stewardship framework. **Better Crops**, v. 105, n. 2, p. 10–13, 2021.

International Plant Nutrition Institute (IPNI). **Potassium in agriculture: Status and perspectives**. IPNI, 2021.

LIU, X.; LI, Q.; LIU, Z.; ZHANG, Y.; WANG, X. Genotypic variation in potassium use efficiency in maize. **Agronomy**, v. 13, n. 5, p. 1150, 2023. https://doi.org/10.3390/agronomy13051150

MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants** (4th ed.). Academic Press. 2022. https://doi.org/10.1016/C2019-0-03317-7

OLIVEIRA, F. H. T.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F. Potassium fertilization in maize grown in tropical soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, e0210123, 2022. https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210123

RAIJ, B. VAN; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. IPNI Brasil. 2022.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Plant physiology and development** (7th ed.). Oxford University Press. 2021.

WANG, L.; ZHOU, H.; FEI, C. Substituting partial chemical nitrogen fertilizers with organic fertilizers maintains grain yield and increases nitrogen use efficiency in maize. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1442123, 2024. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1442123

WU, L.; MA, W.; ZHANG, C.; WU, L.; ZHANG, W.; JIANG, R.; ZHANG, F.; CUI, Z.; CHEN, X. Current potassium-management status and grain-yield response of Chinese maize to potassium application. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 176, n. 3, p. 441–449, 2013. https://doi.org/10.1002/jpln.201200278

CAPÍTULO 7

MILHO CONVENCIONAL E GENETICAMENTE MODIFICADO: RESPOSTA NUTRICIONAL A NÍVEIS DE NITROGÊNIO, FÓSFORO E POTÁSSIO NO SOLO

Ronilson Martins Silva
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo, Brasil

Glaucia Sossai Malvestiti
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo, Brasil

Liliane Maria Romualdo Altão
Centro Universitário Octávio Bastos/ UNIFEOB, Brasil

Arissa Maeshiro
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo, Brasil

Otavio Mapeli
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo, Brasil

Inara Araújo Mota
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo, Brasil

Fernanda Aparecida Brandão Rocha
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo, Brasil

Marcos Vinicius Proença de Oliveira
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo, Brasil

Fernanda de Fátima Silva Devechio
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo, Brasil

DOI: 10.52832/wed.221.1304

Resumo: A crescente demanda por altas produtividades no cultivo do milho tem impulsionado o uso de híbridos com maior potencial genético, exigindo ajustes nas práticas de manejo nutricional para maximizar eficiência. O objetivo deste estudo foi avaliar a produtividade e níveis de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) em milho (*Zea mays* L.) convencional (DKB390) e geneticamente modificado (DKB390PRO), visando recomendações de manejo sob os pontos de vista técnico nutricional. Foram conduzidos seis experimentos em blocos casualizados, com cinco níveis de N, P e K em dois híbridos, totalizando 20 unidades experimentais. Avaliaram-se rendimento de grãos e teores foliares. Os resultados indicaram, para o DKB390, resposta quadrática ao N (máximo de 10.718 kg ha^{-1} com 135 kg ha^{-1}) e respostas lineares ao P e K. Para o DKB390PRO, houve resposta quadrática ao N (máximo de 11.082 kg ha^{-1} com 164 kg ha^{-1}) e ao P e K. O híbrido transgênico apresentou maior eficiência no uso de nutrientes. *Conclusão:* Conclui-se que híbridos de alta tecnologia demandam ajustes nas recomendações de adubação, sendo o DKB390PRO mais viável em altas produtividades.

Palavras-chave: Eficiência nutricional. Produtividade. Transgênico. *Zea mays* L.

1 INTRODUÇÃO

O planejamento de sistemas eficientes de produção deve ser baseado no conhecimento das exigências climáticas e nutricionais da planta (soma térmica, temperatura-referências, fases críticas de estresse, dentre outros) e nas limitações do ambiente de produção (Balaout *et al.*, 2025).

O potencial produtivo é definido nas primeiras semanas, até V8. E, neste período, se não houver a disponibilidade adequada de nutrientes na solução do solo, de forma a permitir que as raízes extraiam nutrientes para o seu desenvolvimento, de nada adianta, pois a quantidade de grãos já está definida (Rodriguez *et al.*, 2024).

O nitrogênio (N) é um dos nutrientes mais limitantes para a obtenção de altas produtividades de milho, e as recomendações de adubação dependem de diversos fatores, como estande de plantas, extração/exportação do nutriente pela cultura, capacidade de suprimento de N pelo solo e índice de aproveitamento do fertilizante nitrogenado pelas plantas (Yang *et al.*, 2026).

A disponibilidade deste nutriente deve ser em quantidades correta para que a planta consiga se desenvolver plenamente e evitar que o nutriente falte ou cause intoxicação, tendo a maior produção aliada com o custo mais adequado, visando manifestar a máxima resposta técnica e econômica por quilograma de nutriente aplicado (Liu *et al.*, 2025).

O P é um componente vital para todos os seres vivos. A quantidade de P exigida por culturas altamente produtivas é grande, porém entre os macronutrientes primários é o menos exigido. A deficiência de P tem impactos amplos como pequeno desenvolvimento de raízes e brotações (Lu *et al.*, 2024).

De acordo com Marschner (2012), o potássio (K) é ativador enzimático de pouco mais de meia centena de enzimas envolvidas em rotas bioquímicas como: translocação de açúcares; abertura e fechamento dos estômatos; regulação osmótica; fotossíntese.

Dentre os fatores que influenciam a produtividade do milho, o material genético desempenha papel fundamental, pois o rendimento de grãos resulta da interação entre genótipo, ambiente e manejo. Assim, a escolha de híbridos adaptados e com alto potencial produtivo é essencial para maximizar a eficiência produtiva e a estabilidade do sistema agrícola (Gonçalves *et al.*, 2025).

Além do melhoramento genético convencional, a transgenia tem contribuído significativamente para o avanço da cultura do milho, permitindo o desenvolvimento de cultivares com resistência a insetos e tolerância a herbicidas, além de maior adaptação a estresses ambientais. Essas tecnologias estão associadas ao aumento da produtividade, à redução do uso de inseticidas e à diminuição dos impactos ambientais, promovendo maior eficiência produtiva e econômica (Gomes *et al.*, 2024). As recomendações de adubação para a cultura do milho têm evoluído continuamente no Brasil, acompanhando avanços no melhoramento genético, no uso de híbridos de alto potencial produtivo e na adoção de práticas de manejo mais eficientes. Atualmente, a definição das doses de fertilizantes considera, além da fertilidade do solo, fatores como expectativa de rendimento, sistema de cultivo e interação entre genótipo, ambiente e manejo (Pandolfi Filho *et al.*, 2024). O milho transgênico MON89034 expressa proteínas inseticidas derivadas de *Bacillus thuringiensis* (Bt), como Cry1A.105 e Cry2Ab2, que atuam no controle de importantes lepidópteros-praga da cultura. Essas proteínas apresentam alta eficácia no manejo de pragas como *Spodoptera frugiperda* e espécies de *Ostrinia*, contribuindo para a redução de danos, maior estabilidade produtiva e menor necessidade de aplicações de inseticidas. No entanto, o uso contínuo dessas tecnologias exige estratégias de manejo de resistência para garantir sua durabilidade no campo (Trisyono *et al.*, 2023). No Brasil, destacam-se como principais insetos-praga da cultura do milho a lagarta-do-cartucho (*Spodoptera frugiperda*), a lagarta-da-espiga (*Helicoverpa zea*) e a broca-do-colmo (*Diatraea saccharalis*), espécies amplamente distribuídas e responsáveis por danos significativos à produtividade, exigindo estratégias eficientes de manejo integrado de pragas (EMBRAPA, 2023).

Assim, o objetivo deste projeto foi avaliar a produtividade e níveis de nitrogênio, fósforo e potássio em milho (*Zea mays* L.) convencional DKB 390 e geneticamente modificado DKB 390PRO (MON89034), para alta produtividade, visando recomendações de manejo da nutrição sob o ponto de vista técnico e nutricional.

2 METODOLOGIA

O trabalho experimental constituiu-se de seis experimentos de campo conduzidos no Talhão 120 localizado na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA-USP) em Pirassununga-SP, em área de baixa fertilidade com Neossolo Quartzarênico. A cultura estudada foi

milho (*Zea mays* L.) cultivado em campo, onde foram utilizados os híbridos DKB390 (convencional) e DKB390PRO (resistente a lagarta).

A caracterização química do solo utilizado nos experimentos está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Análise química do solo, realizada antes do preparo do solo, nas camadas de 0–0,20 e 0,20–0,40 m de profundidade.

Camada	pH ($CaCl_2$)	M.O.	P (res)	S	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Cm		dm^{-3}	mg dm^{-3}	---------- mmolc dm^{-3}---------							%	-------- mg dm^{-3}--------				
0 – 20	5,2	20	7	6	0,4	17	6	18	23	41	56	0,31	0,3	19	0,6	0,2
20 – 40	4,8	16	5	6	0,2	10	3	27	13	40	33	0,67	1,6	19	0,9	0,9

Fonte: Autores, 2026.

Com base nesta análise foi feita a aplicação de 800 kg ha^{-1} de calcário (concentração de CaO=35,5%, MgO=10% e PRNT=90%) com o objetivo de elevar a saturação por bases (V) a 70%, conforme recomendação de Raij *et al.* (1997) para a cultura do milho, além de 1300 kg ha^{-1} de gesso agrícola. O solo apresentou 888 g kg^{-1} de areia, 86 g kg^{-1} de argila e 26 g kg^{-1} de silte na camada de 0-20 cm de profundidade.

Os experimentos foram conduzidos de forma independente para cada híbrido e nutriente estudado, ou seja, foram conduzidos 6 experimentos (3 nutrientes e 2 híbridos). O delineamento experimental foi blocos ao acaso (DBC), com 5 doses do nutriente com 4 repetições.

Os fatores estabelecidos para o estudo foram constituídos por cinco níveis de fornecimento de N sendo T1= omissão completa do nutriente N; T2= 50 kg ha^{-1} de N; T3= 100 kg ha^{-1} de N; T4= 150 kg ha^{-1} de N; T5= 200 kg ha^{-1}de N, T1= omissão completa do P; T2= 40 kg ha^{-1} de P_2O_5; T3= 80 kg ha^{-1} de P_2O_5; T3= 120 kg ha^{-1} de P_2O_5; T5= 160 kg ha^{-1} de P_2O_5; T1= omissão completa do K; T2= 50 kg ha^{-1} de K_2O; T3= 100 kg ha^{-1} de K_2O; T4= 150 kg ha^{-1} de K_2O; T5= 200 kg ha^{-1} de K_2O, combinados em dois híbridos, o DKB390 e o DKB390PRO, totalizando 20 unidades experimentais para cada ensaio. A área das parcelas experimentais foi de 4,8 m^2, com espaçamento entre linha de 0,8 m, perfazendo 6 linhas de 10 metros. Para o N as doses foram subdivididas aplicando-se 30 kg ha^{-1} de N na semeadura, excluindo a omissão e o restante em duas coberturas. A primeira cobertura no estádio V4 aplicou: T1= 0; T2= 20 kg ha^{-1} de N; T3=70 kg ha^{-1} de N; T4= 80 kg ha^{-1} de N e T5= 80 kg ha^{-1} de N. Na segunda cobertura foram aplicados: T1, T2 e T3= 0 kg ha^{-1} de N, T4= 40 kg ha^{-1} de N e T5=150 kg ha^{-1} de N. No experimento com o P, as doses somaram no total 0, 40, 80, 120 e 160 kg ha^{-1}de P_2O_5, e todas foram aplicadas no sulco de semeadura. E nos experimentos de K, as doses somaram no total 0, 50, 100, 150 e 200 kg ha^{-1}de K_2O parceladas em 50 kg de K_2O no sulco de plantio, excluindo a dose zero e o restante na primeira cobertura. Para a cobertura do K no estádio vegetativo V4, foram aplicados T1 e T2= 0 kg ha^{-1} de K_2O, T3= 50 kg

ha^{-1} de K_2O; T4= 100 kg ha^{-1} de K_2O e T5= 150 kg ha^{-1} de K_2O. As dosagens dos macronutrientes N, P e K foram calculadas de acordo com a recomendação de Raij *et al.* (1997), sendo valores fixos para os dois nutrientes que não estava em teste em cada experimento. Para a análise de diagnose foliar foi coletada a folha logo abaixo oposta a espiga no estádio R1, conforme descrito por Coelho e França (1995). A colheita foi realizada nas linhas centrais de cada parcela, e após a debulha do milho foi mensurado o peso total corrigido para 13 % de umidade.

Os resultados foram analisados estatisticamente através da análise de variância, teste de Tukey a 5% de probabilidade. Nos casos em que o teste F foi significativo para doses de N, P e K foi realizada análise de regressão polinomial.

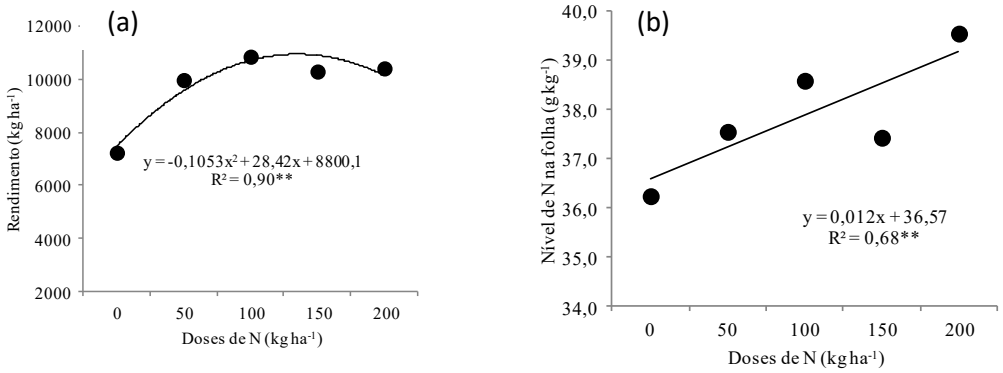
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observou-se efeito significativo ($P<0,05$) do rendimento com o aumento das doses de N, sendo que os dados se ajustaram segundo modelo quadrático (Figura 1), o que corrobora com resultados evidenciados por Silva *et al.* (2005), que ao estudar as doses 50, 100, 150 kg ha^{-1}de N obteve resposta significativa para produtividade do híbrido 30F80, também com dados ajustados em modelo quadrático. A máxima produtividade foi de 10718 kg ha^{-1} na dose de 135 kg ha^{-1}de N, estando abaixo do recomendado por Cantarella *et al.* (2022), para a mesma produtividade esperada 8-10 t ha^{-1}, o autor recomenda para classe de resposta alta a 150 kg ha^{-1} de N, evidenciando que o híbrido de milho que tem melhores condições genéticas, consegue produzir mais com menor quantidade de fertilizante.

O incremento da dose de N proporcionou efeito significativo ($P<0,05$) para o teor de N na folha diagnóstica, ajustando-se ao modelo linear crescente na análise de regressão (Figura 1b), o que corrobora com dados de Fernandes e Buzetti (2005), que ao testarem três doses de N (0, 90 e 180 kg ha^{-1}de N) em três híbridos de milho obtiveram uma equação linear crescente para nível de N na folha.

De acordo com Cantarella *et al.* (2022), o teor adequado de N, nas folhas do milho, para um bom desenvolvimento e produção, está na faixa de 27,5-32,5 g kg^{-1} de matéria seca, neste experimento os teores do nutriente nas folhas estão acima do considerado adequado. A produtividade do DKB390 respondeu de forma crescente ao incremento do nutriente. O teor máximo de N obtido na folha diagnóstica em R1 foi de 39,5 g kg^{-1} na dose de 200 kg ha^{-1} de N, estando acima do citado Okumura *et al.* (2013), que constatou teor de 36,02 g kg^{-1} de N, na dose e 200 kg ha^{-1} respectivamente.

Figura 1 – Rendimento de grãos em kg ha^{-1} para níveis de N para o DKB 390 (a); Teor de N nas folhas em função dos níveis de N para o DKB 390 (b).

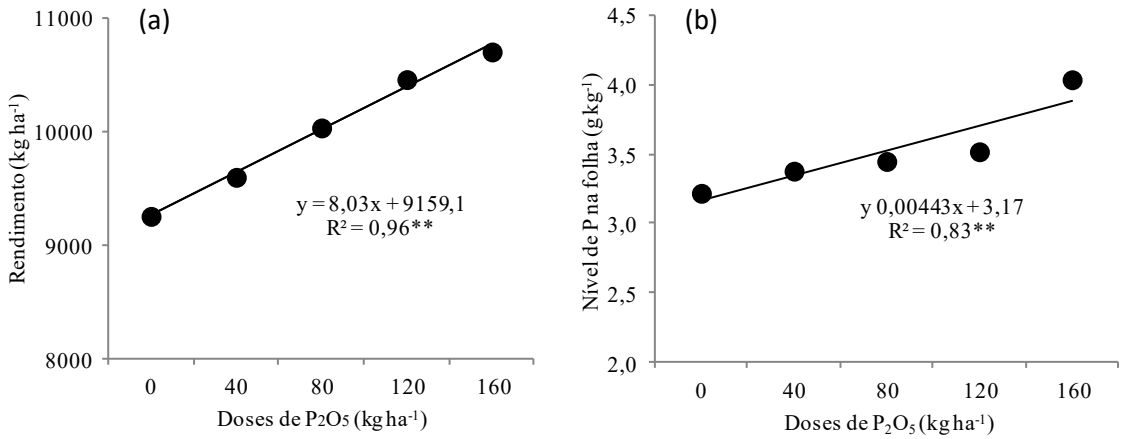


Fonte: Autores, 2026.

O ponto máximo estimado de rendimento de grãos para adubação de N foi obtido com a dose 135 kg ha^{-1}, correspondendo ao teor de N na folha de 38,2 g kg^{-1}.

A resposta do rendimento de grãos foi significativa (P<0,01) quando submetido aos níveis de P. Os resultados ajustaram segundo modelo linear crescente para análise de regressão (Figura 2a).

Figura 2 –Rendimento de grãos em kg ha^{-1} para níveis de P_2O_5 (kg ha^{-1}) (a); Teor foliar de P nas folhas para o híbrido DKB 390 (b).



Fonte: Autores, 2026.

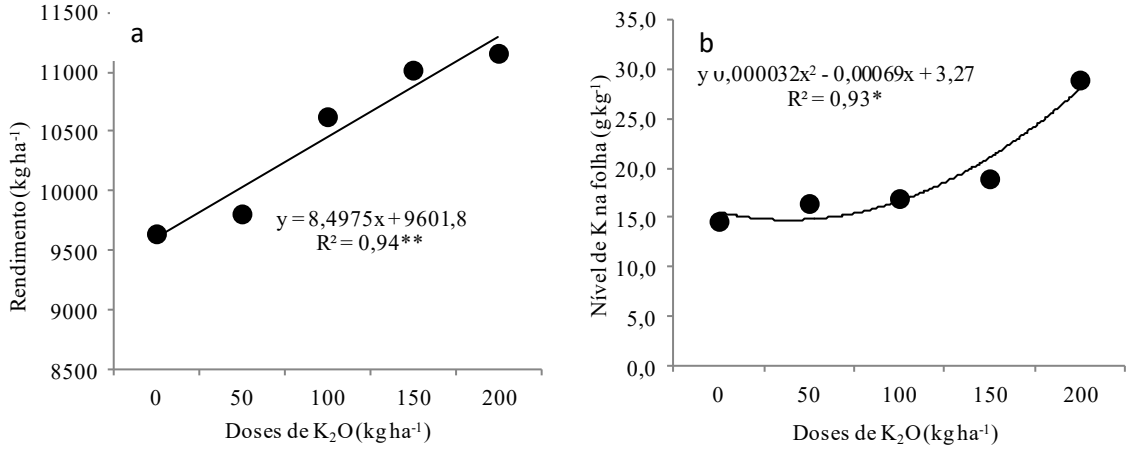
Pereira *et al.* (2020) obtiveram o mesmo comportamento linear crescente para doses de P testadas em milho, o que está de acordo com diversos trabalhos relatados na literatura (Battisti *et al.*, 2023). Com isso, pode-se observar que o milho tem capacidade de responder a doses mais altas do que as avaliadas, nas condições experimentais utilizadas. Porém, pode não ser compensativo financeiramente. As médias de produtividade obtidas nas maiores doses de P foram valores que se

classificam como alto rendimento para milho tecnificado sendo que o rendimento para a dose recomendada por Cantarella *et al.* (2022), baseado na curva obtida no experimento, resultou em 9882 kg ha^{-1} para 90 kg ha^{-1} de P_2O_5, ficou dentro do intervalo sugerido pelos autores.

O teor de P na folha diagnóstica respondeu significativamente (P<0,01) para as doses de P testadas, se ajustando ao modelo linear crescente na análise de regressão (Figura 2b). Segundo Cantarella *et al.* (2022), o teor adequado de P nas folhas do milho, para um desenvolvimento adequado, está situado na faixa de 2,0-4,0 g kg^{-1} de matéria seca. Assim, neste experimento, independente da dose de P testada, o teor do P nas folhas esteve dentro da faixa adequado, possibilitando o desenvolvimento da cultura normalmente. O teor foliar de P e o rendimento de grãos cresceram linearmente. Assim foi possível observar que o P responde ao incremento do nutriente.

O rendimento de grãos apresentou resposta significativa ao incremento de doses de K (P<0,05), com resposta linear na regressão (Figura 3a). Resultados semelhantes têm sido relatados na literatura recente, em que o incremento das doses de potássio promove aumento na produtividade do milho, frequentemente com resposta linear ou linear-platô, especialmente em solos com baixa disponibilidade desse nutriente, em que aumentos de produção em função da aplicação de K têm sido observados apenas em solos com teores muito baixos desse nutriente (ROY *et al.*, 2022). Marschner (2012) atribuíram isto ao fato de o K influenciar diretamente o crescimento celular, pela ativação enzimática no transporte de N, e, portanto, ser de fundamental importância na formação de tecidos vegetais. O rendimento para dose recomendada por Cantarella *et al.* (2022) foi de 10792 kg ha^{-1} para 140 kg ha^{-1} K_2O quando extrapolado na curva obtida no experimento, mostrando-se aproximadamente 7% acima do intervalo sugerido pelo autor.

Figura 3 – Rendimento de grãos em kg ha^{-1}a doses de K_2O em híbrido de milho DKB 390 (a); Teor foliar de K nas folhas em relação a doses de K_2O em híbrido DKB 390 (b).

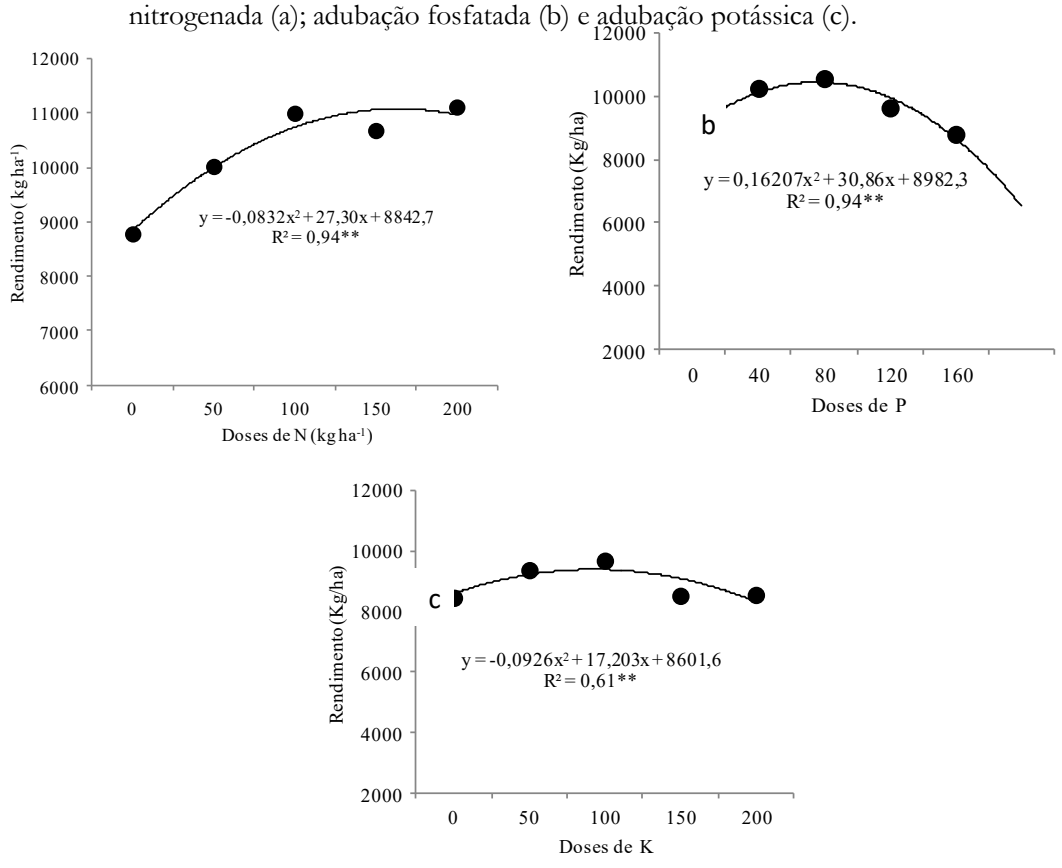


Fonte: Autores, 2026.

Os teores de K nas folhas responderam significativamente para as doses de K aplicadas (P<0,01). Os resultados se comportaram de forma quadrática na análise de regressão (Figura 3b). Dados semelhantes foram obtidos por Bossolani *et al.* (2022) ao teor de K na folha em relação a doses de cloreto de potássio em DKB390, onde a testemunha diferiu significativamente dos outros tratamentos respondendo de forma quadrática a análise de regressão. O teor de K na folha diagnóstica foi de 28,97 g kg^{-1} pela dose de rendimento máximo, sendo o maior teor foliar observado. De acordo com Malavolta (2006), os níveis adequados de K são de 17-30 g kg^{-1}. Somente a dose zero esteve fora desta faixa.

O rendimento respondeu de forma significativa (P<0,01) para as doses de N, ajustando-se ao modelo quadrático conforme Figura 4a, o que corrobora com resultados evidenciados por Silva *et al.* (2005) que ao estudar as doses 50, 100, 150 kg ha^{-1}de N obteve resposta significativa para produtividade do híbrido 30F80, também tendo os dados ajustado de forma quadrática. O ponto máximo de produtividade foi de 11082 kg ha^{-1}com dose 164 kg ha^{-1}de N. Esta dose está 10% acima daquela recomendada por Cantarella *et al.* (2022), para a mesma produção esperada 8 - 10 t ha^{-1}, o autor recomenda para classe de resposta alta dose a 150 kg ha^{-1} kg de N.

Figura 4 – Rendimento de grãos em kg ha^{-1} em milho DKB 390PRO, em resposta à doses de adubação nitrogenada (a); adubação fosfatada (b) e adubação potássica (c).



Fonte: Autores, 2026.

O teor de N na folha diagnóstica comportou-se de forma significativa (P<0,01) ao incremento das doses de N aplicados, conforme Figura 4b**,** estando de acordo com os níveis considerados ideais por Cantarella *et al.* (2022). O teor máximo de N se deu na dose 138 kg ha^{-1}, assim pode-se entender como capacidade fisiológica de absorção do nutriente, que é uma característica que apresenta controle genético e varia de acordo com a cultivar utilizada (Roy *et al.*; 2022).

4 CONCLUSÃO

O aumento das doses de nitrogênio, fósforo e potássio promoveu incrementos significativos na produtividade e nos teores foliares dos nutrientes nos dois híbridos avaliados, evidenciando a forte dependência do milho ao adequado manejo nutricional para expressar alto potencial produtivo.

O nitrogênio foi o nutriente que mais influenciou o rendimento de grãos, com resposta quadrática para ambos os híbridos. O DKB390 apresentou produtividade máxima de 10.718 kg ha^{-1} com 135 kg ha^{-1} de N, enquanto o DKB390PRO atingiu 11.082 kg ha^{-1} com 164 kg ha^{-1} de N, indicando maior exigência nutricional e potencial produtivo do material geneticamente modificado.

O fósforo e o potássio proporcionaram respostas lineares crescentes na produtividade do híbrido convencional, demonstrando que, nas condições do estudo, não foi atingido o ponto de máxima resposta técnica. Os teores foliares desses nutrientes permaneceram dentro ou acima das faixas adequadas, garantindo bom desenvolvimento das plantas.

O híbrido DKB390PRO apresentou maior eficiência no aproveitamento do nitrogênio, refletindo em maior produtividade, o que evidencia a importância do material genético na resposta à adubação.

De forma geral, os resultados indicam a necessidade de ajuste das recomendações de adubação para híbridos de alto potencial produtivo, especialmente os geneticamente modificados, visando maximizar a eficiência nutricional e a produtividade em sistemas tecnificados.

REFERÊNCIAS

BALAOUT, I.; BOJTOR, C.; ILLÉS, A.; ZELENÁK, A.; OCWA, A.; SZÉLES, A. Analysis of the dry matter and essential nutrient accumulation of maize (*Zea mays* L.) in the main phenophases. **Brazilian Journal of Biology**, v. 85, e290013, 2025. https://doi.org/10.1590/1519-6984.290013

BATTISTI, M.; MORETTI, B.; BLANDINO, M.; GRIGNANI, C.; ZAVATTARO, L. Maize response to nitrogen and phosphorus starter fertilisation in mineral-fertilised or manured

systems. **The Crop Journal**, v. 11, n. 3, p. 922–932, 2023. https://doi.org/10.1016/j.cj.2022.12.006

BOSSOLANI, J. W.; MENEGHETTE, H. H. A.; SANCHES, I. R.; DOS SANTOS, F. L.; PARRA, L. F.; LAZARINI, E. 5-year effects of potassium fertilization levels on nutrition balance and yield in the maize/soybean succession. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.53, n. 16, 2017–2028, 2022. https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2070192

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATTOS JUNIOR, D.; BOARETTO, R. M.; VAN RAIJ, B. (Eds.). **Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Instituto Agronômico (IAC). 2022.

COELHO, A. M., & FRANÇA, G. E. **Seja o doutor do seu milho: Nutrição e adubação**. POTAFOS. 1995.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). **Infestação e flutuação populacional de lepidópteros-pragas em sistemas de produção de milho e sorgo**. Embrapa Milho e Sorgo. 2023.

FERNANDES, F. C. S.; BUZETTI, S. Effect of nitrogen levels on the productivity of six maize (*Zea mays* L.) cultivars. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, v. 4, n. *7,* 2005.

GOMES, A. S. L. P. B.; WEBER, S. H.; LUCIANO, F. B. Resistance of transgenic maize cultivars to mycotoxin production: Systematic review and meta-analysis. **Toxins**, v. 16, n. 8, p. 373, 2024. https://doi.org/10.3390/toxins16080373

GONÇALVES, V. M. L.; DA SILVA JR., I. R.; CATARINA, R. S.; CREVELARI, J. A.; PEREIRA, M. G. Performance of maize hybrids for grain yield under different planting arrangements. *Crops, 5*, 90, 2025. https://doi.org/10.3390/crops5060090

LIU, L. Y.; LIAO, L.; YAN, X.; TIAN, A.; XIA, C.; ZHANG, H.; HE, R.; LI, R.; LIU, J.; GUOQING, S.; HUANG, Q.; YIN, X. W.; LI, Q.; REN, Y. Contribution characteristics of nitrogen accumulation and distribution to grain yield of maize. **BMC Plant Biology**, v. 25, p. 1377, 2025. https://doi.org/10.1186/s12870-025-07299-8

LU, H.; REN, M.; LIN, R.; JIN, K.; MAO, C. Developmental responses of roots to limited phosphate availability: Research progress and application in cereals. **Plant Physiology**, v. 196, n. 4, p. 2162–2174, 2024. https://doi.org/10.1093/plphys/kiae495

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Agronômica Ceres, 2006.

MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants** (3rd ed.). Academic Press, 2012.

OKUMURA, R. S.; YANO, G. T.; MARIANO, D. C.; ZACCHEO, P. V. C.; TAKAHASHI, H. W. Nitrogen nutrition in maize fertilized with treated urea as a urease inhibitor. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 1, p. 157–170, 2013.

PANDOLFI FILHO, L.; GONÇALVES, C. A.; SOARES, N. S. Influência da adubação nitrogenada no desenvolvimento da fase inicial do híbrido de milho BM163. **Revista Agrária**

Acadêmica, v. 7, n. *3,* p.115–124, 2024. https://doi.org/10.32406/v7n3/2024/115-124/agrariacad

PEREIRA, N. C. M.; GALINDO, F. S.; GAZOLA, R. P. D.; DUPAS, E.; ROSA, P. A. L.; MORTINHO, E. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. Corn yield and phosphorus use efficiency response to phosphorus rates associated with plant growth-promoting bacteria. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, n. 40, 2020. https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00040

RAIJ, B. VAN.; CANTARELLA, H. MAIZE FOR GRAINS AND SILAGE. IN B. VAN RAIJ, H. CANTARELLA, J. A. QUAGGIO, & A. M. C. Furlani (Eds.), **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo** (2nd ed., pp. 56–59). Instituto Agronômico. 1997.

RODRIGUEZ, I. M.; LACASA, J.; LEMAIRE, G.; ZHAO, B.; ATA-UL-KARIM, S. T.; CIAMPITTI, I. A. Crop nitrogen status and yield formation: A cross-species comparison for maize, rice, and wheat field crops. **Field Crops Research**, v. 316, p.109515. 2024. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109515

ROY, N. S.; BASNET, P.; RAMEKAR, R. V.; UM, T.; YU, J.-K.; PARK, K.-C.; CHOI, I.-Y. Alternative splicing dynamics in dwarf soybean derived from cross of *Glycine max* and *Glycine soja*. **Agronomy**, v. 12, 1685, 2022. https://doi.org/10.3390/agronomy12071685

SILVA, E. C.; BUZETTI, S.; GUIMARÃES, G. L.; LAZARINI, E.; SÁ, M. E. Nitrogen rates and application timing in maize under no-tillage on a Red Latosol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, *29*, 353–362, 2005.

TRISYONO, Y. A.; ARYUWANDARI, V. E. F.; RAHAYU, T.; MARTINELLI, S.; HEAD, G. P.; PARIMI, S.; CAMACHO, L. R. Baseline susceptibility of field populations of *Ostrinia furnacalis* in Indonesia to the proteins Cry1A.105 and Cry2Ab2 of *Bacillus thuringiensis*. **Toxins**, v. 15, n. 10, 602, 2023. https://doi.org/10.3390/toxins15100602

YANG, Y.; WEN, T.; WANG, H.; MA, J.; SHI, X.; YAN, S.; MU, X.; LI, C.; ZHENG, H.; LIU, D.; ZHAO, X. X. Response of maize varieties with different nitrogen efficiencies to nitrogen fertilizer. **Agronomy**, v. 16, n. 1, 109, 2026. https://doi.org/10.3390/agronomy16010109

CAPÍTULO 8

RESPOSTAS DE TRÊS GENÓTIPOS DE FEIJÃO-FAVA À DEFICIÊNCIA DE NITROGÊNIO NO DESENVOLVIMENTO INICIAL

Jhoice Ferreira Borges
Universidade Federal do Piauí, Brasil

Janderson Moura da Silva
Universidade Federal do Piauí, Brasil

Sabrina Hermelindo Ventura
Universidade Federal do Piauí, Brasil

Larissa Macelle de Paulo Barbosa
Universidade Federal do Piauí, Brasil

Mayanna Karlla Lima Costa
Universidade Federal do Piauí, Brasil

Tailande Novaes de Aquino
Universidade Federal do Piauí, Brasil

Janáira Rocha Campos
Universidade Federal do Piauí, Brasil

Eudemio Sousa Brito Junior
Universidade Federal do Piauí, Brasil

Sandra Mara Barbosa Rocha
Universidade Federal do Piauí, Brasil

Julian Junio de Jesús Lacerda
Universidade Federal do Piauí, Brasil

DOI: 10.52832/wed.221.1305

Resumo: O nitrogênio (N) é essencial ao metabolismo vegetal, compondo proteínas, aminoácidos e clorofila, e sua deficiência pode limitar o crescimento inicial do feijão-fava (*Phaseolus lunatus* L.). Este trabalho avaliou o efeito da deficiência de N sobre o desenvolvimento inicial de três genótipos de feijão-fava, visando identificar materiais mais eficientes no uso desse nutriente. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, utilizando areia lavada e duas condições nutricionais: com N (C/N) e sem N (S/N), em delineamento inteiramente casualizados, com quatro repetições. Aos 30 dias após a emergência, foram analisadas variáveis morfofisiológicas, como comprimento e massa seca da parte aérea e raiz, diâmetro do caule e índices de clorofila *a*, *b* e total. Os dados foram submetidos à ANAVA e teste de Tukey ($p<0,05$). A deficiência de N reduziu significativamente os pigmentos fotossintéticos. O genótipo G2 apresentou maiores teores de clorofila, porém menor desenvolvimento vegetativo. O G3 destacou-se pelo maior acúmulo de massa seca e diâmetro do caule, mesmo sob deficiência, indicando maior eficiência no uso de N. Algumas variáveis não diferiram, indicando crescimento via reservas de sementes. Conclui-se que há variabilidade na resposta à deficiência de N entre os genótipos avaliados, sendo o G3 o mais promissor.

Palavras-chave: Nutrição vegetal. *Phaseolus lunatus* L.. Seleção genotípica.

1 INTRODUÇÃO

A cultura do feijão-fava (*Phaseolus lunatus* L.) destaca-se pelo elevado valor nutricional de suas sementes, com potencial para melhorar a segurança alimentar (Adebo, 2023). Para que esse potencial produtivo e nutricional seja plenamente expresso, o suprimento adequado de nutrientes, especialmente o nitrogênio (N), torna-se fundamental. O nitrogênio é um nutriente essencial ao metabolismo vegetal, integrando moléculas vitais como aminoácidos, proteínas e clorofila, sendo sua disponibilidade determinante para o crescimento e estabelecimento das plantas nas fases iniciais (Chen *et al.*, 2021; Jiang *et al.*, 2024).

A deficiência de N pode comprometer o alongamento radicular e da parte aérea, reduzir a produção de massa seca e provocar sintomas de clorose foliar, interferindo diretamente na capacidade fotossintética das plantas (Lopez *et al.*, 2023; Carvajal *et al.*, 2023). Nesse contexto, a eficiência no uso do nitrogênio emerge como um critério relevante na avaliação de genótipos, uma vez que está diretamente relacionada à adaptação das plantas a ambientes com baixa disponibilidade desse nutriente.

Estudos anteriores reforçam essa importância, como demonstrado por Zeffa *et al.* (2023), no qual cultivares de feijão-comum, como IAC-Alvorada, IPR Sabiá e IPR Saracura, apresentaram desempenho superior tanto na presença quanto na ausência de adubação nitrogenada, evidenciando maior eficiência no aproveitamento do nitrogênio. Esses resultados indicam que há variabilidade genética significativa quanto à resposta ao suprimento de N, o que pode ser explorado em programas de seleção.

No entanto, ainda são limitados os estudos voltados à avaliação da eficiência nutricional de genótipos de feijão-fava em condições de restrição de nitrogênio, especialmente nas fases iniciais

de desenvolvimento. Portanto, este estudo visa avaliar os efeitos da deficiência de nitrogênio no estágio inicial de desenvolvimento de três genótipos de feijão-fava, contribuindo para a identificação de materiais com maior tolerância a deficiência desse nutriente.

2 METODOLOGIA

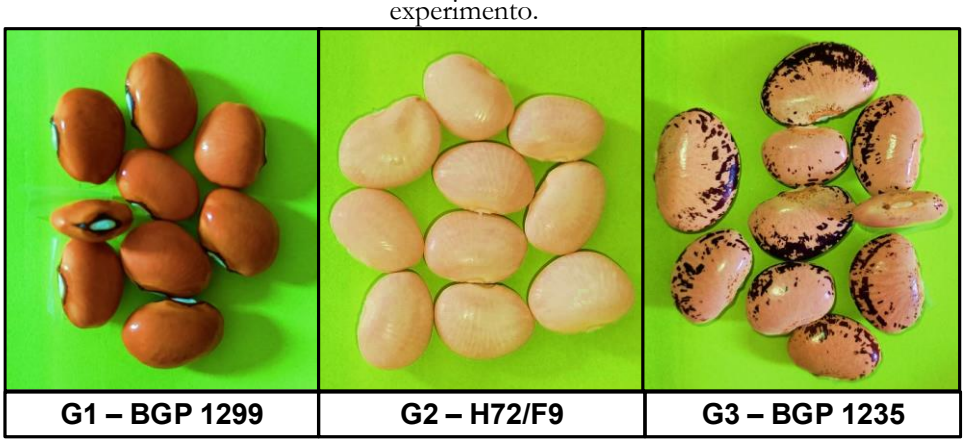
2.1 Local do experimento

O experimento foi conduzido em uma estufa no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Piauí (UFPI), em Teresina, PI, Brasil (5°02'34.4" S 42°47'00.3" W, 72 m de altitude), de maio a junho de 2025. O clima é classificado como tropical (Aw), com uma precipitação média anual de 1.500 mm e temperatura média de 27°C.

2.2 Procedimentos experimentais

Três genótipos de feijão-fava foram obtidos do banco de germoplasma da UFPI: duas variedades crioulas, a BGP-1299 e a BGP-1235, e uma variedade em processo de melhoramento (H72/F9), todas com crescimento indeterminado (Figura 2). Cada genótipo foi submetido aos seguintes tratamentos: (a) Solução nutritiva completa (C/N) e (b) Solução nutritiva com omissão de N (S/N). O experimento foi conduzido em um delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições, totalizando 24 unidades experimentais.

Figura 1 - Sementes dos três genótipos de feijão-fava utilizados no experimento.



Fonte: Arquivo pessoal de Jhoice F. Borges (2025). *BGP- Banco de Germoplasma *Phaseolus*.

As sementes de cada genótipo de feijão-fava foram semeadas em copos plásticos de 770 mL, preenchidos com areia lavada inerte. Cada copo recebeu duas sementes de acordo com o tratamento. Sete dias após a emergência das plantas, foi realizado o desbaste para manter uma planta por vaso. As soluções nutritivas (com e sem N) foram preparadas de acordo com a metodologia de Hoagland e Arnon (1950). A aplicação foi realizada diariamente, com uma dose

padronizada de 3 mL por copo. A irrigação foi feita diariamente utilizando o método gravimétrico, com base na capacidade de retenção de água do solo, mantendo a umidade do solo em 70% da capacidade de campo.

2.3 Variáveis analisadas

Aos 30 dias após a emergência do feijão-fava, crescimento vegetativo, avaliou-se o comprimento da parte aérea (cm), e o diâmetro do caule (mm) com o auxílio de um paquímetro. Os teores de clorofila *a*, *b* e total (*a* + *b*) foram estimados de forma indireta, por meio de leituras realizadas com o clorofilômetro (Clorofilog®). Os resultados foram expressos em Índice de Clorofila Falker (ICF), refletindo a quantidade relativa de clorofila presente nas folhas. Posteriormente, as plantas foram coletadas para avaliação dos seguintes parâmetros: Comprimento de raiz (cm), massa seca da parte aérea - MSPA (g), das raízes – MSR (g) e total – MST (g).

O comprimento de parte aérea e raiz das plantas de feijão-fava foram medidos com o auxílio de uma régua graduada. Para o comprimento de parte aérea, considerou-se a distância entre o colo da planta e a gema terminal (meristema apical); para o comprimento da raiz principal, foi considerada a distância do colo até a extremidade apical da raiz. Para a determinação da MSPA e MSR, a parte aérea e as raízes foram acondicionadas em sacos de papel e colocados para secar em estufa de circulação forçada a 65°C até atingir peso constante. A MST foi obtida pelo somatório da MSPA e da MSR.

2.4 Análise de dados

Primeiramente, os dados foram testados quanto à normalidade e homogeneidade de variâncias utilizando, respectivamente, os testes de Shapiro-Wilk e Levene, no programa de análise estatística RStudio (versão 4.4.0). As médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. A análise gráfica dos dados também foi realizada no programa estatístico R, utilizando o pacote ggplot2 para a construção dos gráficos de barras.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação visual das plantas de feijão-fava

De modo geral, não foram observadas diferenças visuais claras entre os tratamentos com e sem N dentro de cada genótipo (Figura 2A, 2B e 2C). Em todos os genótipos, foi possível observar uma leve clorose nas folhas, independentemente do tratamento aplicado. Além disso, quando comparamos visualmente os tratamentos C/N e S/N dentro de cada genótipo, não é possível observar diferenças no crescimento da parte aérea. Esses resultados sugerem que, no estágio inicial

de desenvolvimento, os três genótipos avaliados podem apresentar certa tolerância à limitação de nitrogênio ou capacidade de mobilizar reservas dos cotilédones para sustentar o crescimento (Angermann *et al.*, 2025).

Figura 2 - Comparação visual do crescimento inicial e dos sintomas de deficiência de nitrogênio em três genótipos de feijão-fava sob diferentes condições de disponibilidade de nitrogênio. As imagens ilustram o desenvolvimento de plantas cultivadas com suprimento de nitrogênio (C/N) e sob deficiência de nitrogênio (S/N). (A) Genótipo 1 (G1 = BCP 1299); (B) Genótipo 2 (G2 = H72/F9); (C) Genótipo 3 (G3 = BCP 1235).



Fonte: Arquivo pessoal de Jhoice F. Borges (2025).

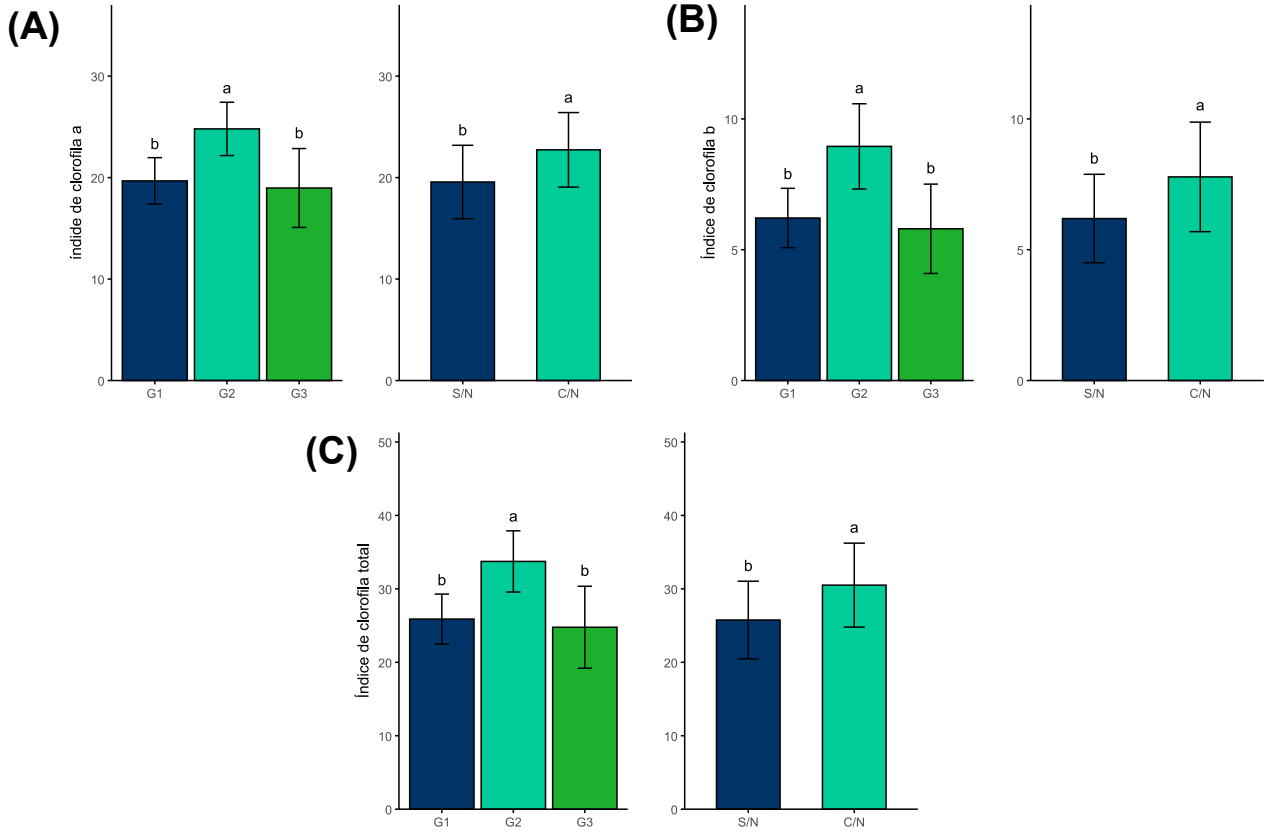
3.2 Efeito do Nitrogênio e do genótipo nos índices de clorofila

Com relação aos índices de clorofila *a, b* e total (Figura 3), observou-se que não houve interação entres os fatores genótipos e a ausência ou presença do N, ou seja, as diferentes condições nutricionais não influenciaram, de forma diferenciada, os genótipos estudados. No entanto, foi observada variações significativas quando comparado cada fator de forma isolada.

De modo geral, para os índices de clorofila *a*, *b* e total (Figura 3A, 3B e 3C), o genótipo G2 apresentou valor significativamente superior em relação aos genótipos G1 e G3 ($p < 0,05$). Esses resultados indicam uma maior capacidade do genótipo G2 em acumular pigmentos fotossintéticos, evidenciando que diferentes genótipos apresentam variações na concentração desses pigmentos, sendo um parâmetro importante a se considerar na seleção de genótipos de feijão-fava (Cillis *et al.*, 2019; Siqueira *et al.*, 2023).

A aplicação de nitrogênio promoveu aumento significativo no índice de clorofila *a*, *b* e total, com o tratamento C/N apresentando valores superiores ao S/N. Diversos estudos mostram que o fornecimento de nitrogênio eleva os teores de clorofila *a*, clorofila *b* e carotenoides em culturas como arroz e trigo, promovendo maior eficiência fotossintética e crescimento das plantas (Peng *et al.*, 2021; Fornari *et al.*, 2020).

Figura 3 - Índices de clorofila *a* (A), clorofila *b* (B) e clorofila total (C) em três genótipos de feijão-fava submetidos a tratamentos com (C/N) e sem nitrogênio (S/N). Comparação feita dentro de cada fator. Letras diferentes sobre as colunas indicam diferenças estatísticas significativas entre os grupos de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$). G1 = genótipo BCP 1299; G2 = genótipo H72/F9; G3 = BCP 1235.



Fonte: Autores, 2026.

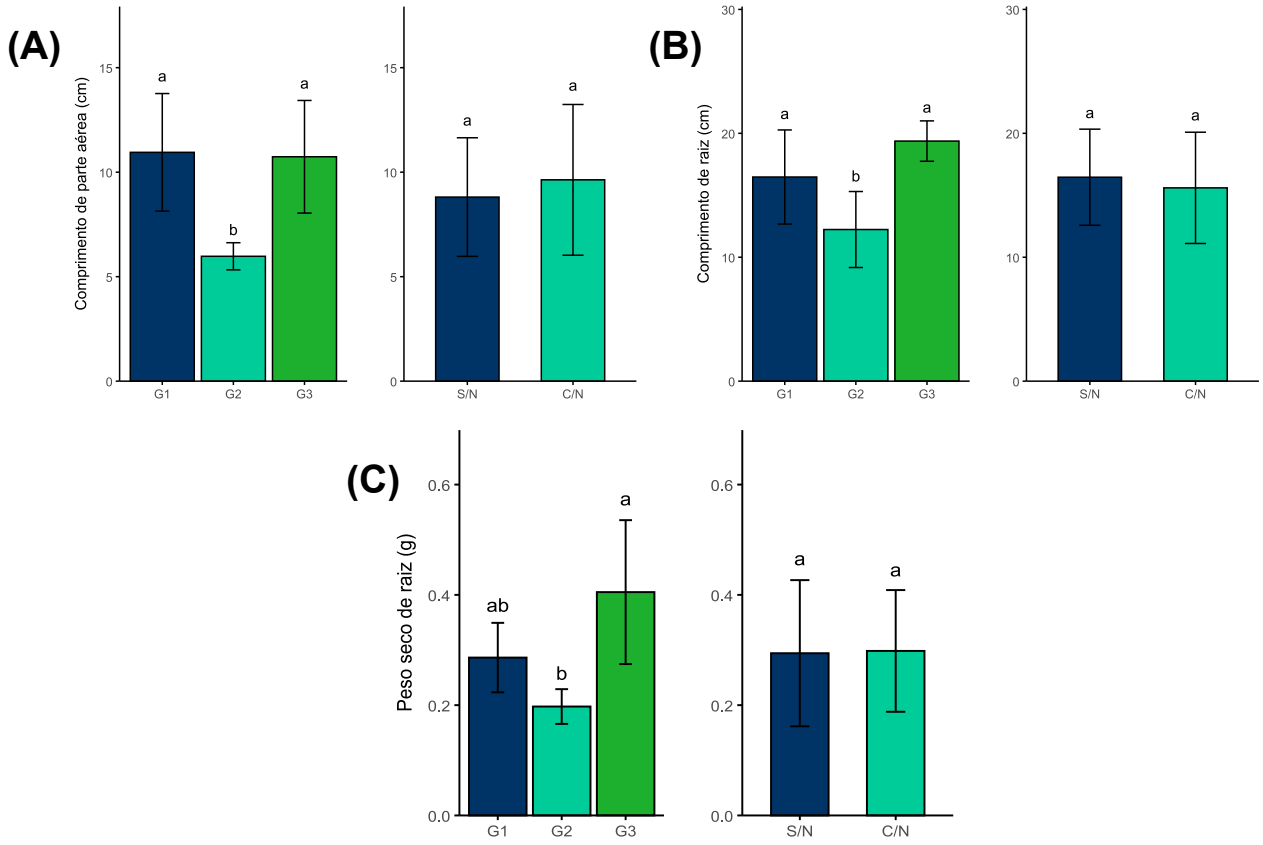
3.3 Influência do genótipo e do Nitrogênio no crescimento inicial

Com relação ao crescimento da parte aérea, comprimento de raiz e peso seco radicular (Figura 4), observou-se que não houve interação entres os fatores genótipos e a ausência ou presença do N. Dessa forma, foram feitas comparações de cada fator de forma isolada. Os resultados mostram diferenças significativas entre os genótipos quanto ao crescimento da parte aérea, comprimento de raiz e peso seco radicular (Figura 4A, 4B e 4C). O genótipo G2 apresentou valores significativamente inferiores de comprimento da parte aérea (Figura 4A) e comprimento de raiz (Figura 4B) em comparação aos genótipos G1 e G3, e peso seco de raiz (Figura 4C) significativamente menor que G3 e igual a G1 ($p < 0,05$).

Apesar do genótipo G2 apresentar os maiores índices de pigmentos fotossintéticos, como visto na figura 2, ele demonstrou menor desenvolvimento radicular e aéreo em comparação a G1 e G3. Esse padrão corrobora os achados de Simkin *et al.* (2022), que relatam que altos níveis de pigmento não garantem maior biomassa, pois fatores como eficiência no uso da luz e destinação

de fotoassimilados desempenham papel crucial. Além disso, Keller *et al.* (2022) reforçam que genótipos podem variar na eficiência de conversão da fotossíntese em crescimento vegetativo.

Figura 4 - (A) Comprimento médio da parte aérea e da (B) raiz e (C) peso seco de raiz, de três genótipos de feijão-fava cultivados sob tratamentos com nitrogênio (C/N) e sem nitrogênio (S/N). Comparação feita dentro de cada fator. Letras diferentes sobre as colunas indicam diferenças estatísticas significativas entre os grupos (Tukey, $p < 0,05$). G1 = genótipo BCP 1299; G2 = genótipo H72/F9; G3 = BCP 1235.



Fonte: Autores, 2026.

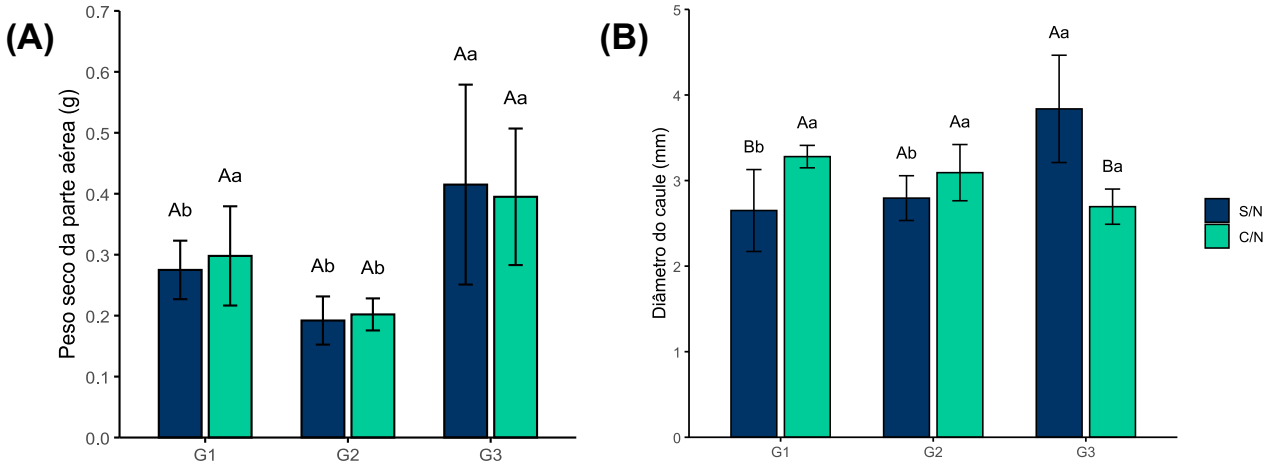
Por outro lado, não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos nutricionais (S/N e C/N) para nenhuma das variáveis analisadas, indicando que os efeitos observados são majoritariamente devidos ao fator genético e que o fornecimento de nitrogênio não influenciou o desenvolvimento da parte aérea e raiz nesse estádio. Como apontado por Reinprecht *et al.* (2020), a resposta morfológica de genótipos de feijão à disponibilidade de nitrogênio pode ser modulada por características intrínsecas da planta, como eficiência de transporte e redistribuição desse nutriente.

Com relação aos resultados do peso seco da parte aérea (Figura 5A), é possível observar que houve interação significativa entre os genótipos (G1, G2 e G3) e as condições nutricionais (C/N e S/N). Na condição com aplicação do Nitrogênio, os genótipos G1 e G3 apresentaram

maiores biomassa seca em relação ao G2. Em S/N, G3 manteve-se superior, enquanto G1 e G2 não diferiram entre si. Não houve diferença significativa entre C/N e S/N para nenhum dos genótipos testados.

A ausência de diferença significativa no peso seco da parte aérea entre as condições C/N e S/N para todos os genótipos sugere que, nas fases iniciais de desenvolvimento, as plantas foram capazes de sustentar o crescimento mesmo sob baixa disponibilidade nutricional. Essa resposta pode estar associada à mobilização eficiente das reservas armazenadas nas sementes, processo essencial durante a germinação e estabelecimento inicial. Segundo Zhao *et al.* (2018), a degradação de compostos de reserva, como amido, proteínas e lipídios, fornece energia e nutrientes fundamentais para o crescimento inicial, sendo que a eficácia dessa mobilização pode variar entre espécies e genótipos.

Figura 5 - (A) Peso seco da parte aérea e (B) diâmetro do caule dos três genótipos de feijão-fava submetidos a diferentes condições nutricionais (com e sem nitrogênio). Letras maiúsculas comparam as diferentes condições nutricionais (C/N e S/N) dentro de cada genótipo e as letras minúsculas comparam os genótipos dentro de cada condição nutricional (C/N e S/N). Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. G1 = genótipo BCP 1299; G2 = genótipo H72/F9; G3 = BCP 1235.



Fonte: Autores, 2026.

A análise do diâmetro do caule (Figura 5B) dos três genótipos de feijão-fava (G1, G2 e G3) cultivados sob diferentes condições nutricionais (C/N e S/N) revelou interações significativas. O genótipo G1 apresentou maior diâmetro do caule quando cultivado com nitrogênio (C/N), diferindo significativamente da condição sem nitrogênio (S/N), o que indica alta dependência desse nutriente para o desenvolvimento estrutural. Já o genótipo G2 não demonstrou diferença significativa entre as soluções nutricionais, sugerindo um comportamento mais estável frente à deficiência de nitrogênio. Por outro lado, o genótipo G3 apresentou maior diâmetro do caule na ausência de nitrogênio, contrastando com os demais genótipos.

Essas respostas diferenciadas indicam variações na eficiência de uso do nitrogênio (EUN) entre os genótipos avaliados. De acordo com Fageria *et al.* (2010), plantas com maior EUN são capazes de manter o crescimento mesmo sob limitações nutricionais, o que pode explicar o desempenho do G3 na condição S/N. Javed *et al.* (2022) destaca que o nitrogênio é essencial para a síntese de proteínas estruturais, o que justifica o maior diâmetro observado em G1 sob C/N.

4 CONCLUSÃO

Os resultados demonstram que os genótipos de feijão-fava apresentam respostas morfofisiológicas distintas frente à deficiência de nitrogênio, sendo o genótipo G3 o mais promissor em termos de crescimento e estabilidade sob baixa disponibilidade do nutriente.

A ausência de diferenças significativas em algumas variáveis entre os tratamentos C/N e S/N sugere que, nas fases iniciais, os genótipos podem sustentar o crescimento em condições de baixa disponibilidade de N.

Esses achados contribuem para a seleção de materiais mais eficientes no uso do nitrogênio, com potencial para cultivo em ambientes de baixa fertilidade, no entanto, ainda é necessário estudos futuros que avaliem a eficiência desses genótipos em fases mais avançadas de crescimento.

REFERÊNCIAS

ADEBO, J. A. A review on the potential food application of lima beans (*Phaseolus lunatus* L.), an underutilized crop. **Applied Sciences**, v. 13, n. 3, p. 1996, 2023.

ANGERMANN, C. *et al.* Balancing nutrient remobilization and photosynthesis: the dual role of lupin cotyledons after germination. **bioRxiv**, 2025.

CARVAJAL, J. E. V. *et al.* Macronutrient omission influences morphological parameters, growth, and yield in *Arracacia xanthorrhiza* Bancroft. ***Heliyon***, v. 9, n. 2, p. e13062, 2023.

CHEN, H. *et al.* Nitrogen form-mediated ethylene signal regulates root-to-shoot K+ translocation via NRT1.5. **Plant Cell and Environment**, v. 44, p. 3806-3818, 2021.

CILLIS, F. de *et al.* Yield and quality of faba bean (*Vicia faba* L. var. major) genotypes as a vegetable for fresh consumption: a comparison between Italian landraces and commercial varieties. **Agriculture**, v. 9, n. 12, p. 253, 2019.

FAGERIA, N. K.; MORAIS, O. P. de; SANTOS, A. B. dos. Nitrogen use efficiency in upland rice genotypes. **Journal of Plant Nutrition**, v. 33, n. 11, p. 1696-1711, 2010.

FORNARI, E. Z. *et al.* Relationship between photosynthetic pigments and corn production under nitrogen sources. ***Pesquisa Agropecuária Tropical***, v. 50, 2020.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. **The water culture method for growing plants without soils**. Berkeley: Agricultural Experimental Station, 1950. 347 p.

JAVED, T. *et al.* Recent advances in agronomic and physio-molecular approaches for improving nitrogen use efficiency in crop plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 2022.

JIANG, H. *et al.* MdBT2 regulates nitrogen-mediated cuticular wax biosynthesis via a MdMYB106-MdCER2L1 signalling pathway in apple. **Nature Plants**, v. 10, p. 131-144, 2024.

KELLER, B. *et al.* Toward predicting photosynthetic efficiency and biomass gain in crop genotypes over a field season. **Plant Physiology**, v. 188, n. 1, p. 301-317, 2022.

LOPEZ, G. *et al.* Nutrient deficiency effects on root architecture and root-to-shoot ratio in arable crops. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1067498, 2023.

PENG, J. *et al.* Effects of nitrogen application rate on the photosynthetic pigment, leaf fluorescence characteristics, and yield of indica hybrid rice and their interrelations. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 7485, 2021.

REINPRECHT, Y. *et al.* Effects of nitrogen application on nitrogen fixation in common bean production. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 2020.

SIMKIN, A. J. *et al.* The role of photosynthesis related pigments in light harvesting, photoprotection and enhancement of photosynthetic yield *in planta*. **Photosynthesis Research**, v. 152, p. 23-42, 2022.

SIQUEIRA, J. A. C. *et al.* The use of photosynthetic pigments and SPAD can help in the selection of bean genotypes under fertilization organic and mineral. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 22610, 2023.

ZEFFA, D. M. *et al.* Multivariate analyses reveal key traits in the identification of nitrogen-use-efficient cultivars of common beans. **Agronomy Journal**, v. 115, p. 1037-1050, 2023.

ZHAO, M. *et al.* Mobilization and role of starch, protein, and fat reserves during seed germination of six wild grassland species. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, 2018.

PARTE III — ESTABELECIMENTO, PRODUÇÃO E MANEJO DAS CULTURAS

CAPÍTULO 9

AVALIAÇÃO DO VIGOR DE SEMENTES DE LINHAÇA (*LINUM USITATISSIMUM* L.) UTILIZANDO O TESTE DE pH DO EXSUDATO COMO INDICADOR FISIOLÓGICO

Mateus Basilio de Oliveira
Universidade Estadual da Paraíba, Brasil

Elaine Gonçalves Rech
Universidade Estadual da Paraíba, Brasil

DOI: 10.52832/wed.221.1306



Resumo: Objetivou-se avaliar a eficiência do teste de pH do exsudato na determinação do potencial fisiológico de sementes de linhaça (*Linum usitatissimum* L.). O experimento foi conduzido no Laboratório Didático de Análises de Sementes da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), entre maio e outubro de 2025, utilizando quatro lotes de sementes. Foram avaliados o grau de umidade, germinação, primeira contagem, emergência de plântulas em areia, comprimento, massa fresca e seca e peso de mil sementes. O teste de pH do exsudato foi realizado em quatro períodos de embebição (30, 60, 90 e 120 minutos), totalizando 16 tratamentos. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com três repetições de 50 sementes. Os dados foram submetidos à análise de variância, teste de Tukey (5%) e correlação linear. Os testes de germinação, primeira contagem e emergência foram eficientes na distinção dos lotes, classificando L4 como superior e L1 como inferior. O teste de pH do exsudato, principalmente aos 30 e 60 minutos, mostrou eficiência na estimativa rápida da viabilidade, com correlação com o vigor. Conclui-se que o teste é promissor para avaliação rápida da qualidade fisiológica de sementes de linhaça.

Palavras-chave: Linhaça. Potencial Fisiológico. Vigor.

1 INTRODUÇÃO

A linhaça (*Linum usitatissimum* L.) tem sua origem na Ásia, havendo relatos de sua utilização há cerca de 5.000 anos a.C., na região da Mesopotâmia. De acordo com Oliveira *et al.* (2012), tanto na América do Norte quanto em países europeus, seu consumo é bastante comum. Essa cultura pode ser cultivada em regiões de clima quente e frio, sendo classificada como uma oleaginosa.

A semente de linhaça apresenta diversas utilidades industriais, sendo empregada na fabricação de tintas, vernizes, resinas, sabões, borrachas sintéticas, linóleo, calafetação, proteção de madeiras, massa para vidro, além de aplicações em cosméticos, entre outros. Seus subprodutos também são utilizados na alimentação animal. Mais recentemente, tem-se investigado a produção de óleo de linhaça como fonte alternativa para biocombustíveis (Cosmo, 2014).

Para a obtenção de elevados níveis de produtividade no campo, é fundamental a utilização de sementes de alta qualidade, que apresentem características fisiológicas adequadas, como elevados índices de vigor, germinação e sanidade (França Neto *et al.*, 2010). Nesse contexto, é amplamente reconhecido que o uso de sementes de qualidade contribui para maiores rendimentos, sendo a semente responsável por expressar todo o potencial genético de uma cultivar (Facco & Tischer, 2022).

Segundo Krzyzanowski *et al.* (2018), a qualidade de sementes está relacionada a fatores fisiológicos, genéticos, físicos e sanitários. Entre esses, os aspectos fisiológicos, especialmente germinação e vigor, são fundamentais, sendo o vigor um dos principais atributos a ser considerado na implantação de lavouras, pois permite identificar diferenças no desempenho entre lotes de sementes.

A avaliação do potencial fisiológico das sementes é essencial nos programas de controle de qualidade, pois possibilita a identificação de lotes com maior probabilidade de desempenho

satisfatório no campo (Souza *et al.*, 2010). Nesse sentido, os testes de vigor têm sido utilizados como complemento ao teste de germinação, que apresenta limitações, principalmente quanto à diferenciação entre lotes e ao tempo necessário para obtenção dos resultados (Custódio, 2005).

O desenvolvimento e a padronização de testes de vigor são fundamentais para garantir um controle de qualidade eficiente, devendo esses métodos ser rápidos e precisos na avaliação do potencial fisiológico e na diferenciação entre lotes (Fessel *et al.*, 2010). A rapidez na obtenção de resultados confiáveis é um fator crucial, pois permite maior agilidade na tomada de decisões, reduzindo riscos e custos nas etapas de produção, como colheita, processamento, armazenamento e comercialização (Hilst *et al.*, 2012).

Dentre os testes de vigor rápidos, destacam-se aqueles baseados na permeabilidade das membranas celulares, como o teste do pH do exsudato, que se fundamenta na lixiviação de solutos e na integridade do tegumento das sementes (Santos *et al.*, 2011). De acordo com Rech (2021), embora esse teste tenha evoluído ao longo do tempo, ainda há necessidade de ajustes metodológicos para diferentes espécies, bem como estudos que definam os períodos ideais de embebição para maximizar sua eficiência.

Diante disso, observa-se a ausência de estudos relacionados à aplicação do teste de pH do exsudato em sementes de linhaça. Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência desse teste na determinação do potencial fisiológico de sementes de linhaça, bem como sua capacidade de diferenciar o vigor entre lotes.

2 METODOLOGIA

O experimento foi conduzido no Laboratório de Análises de Sementes da Faculdade de Agronomia e no viveiro de produção de mudas do setor de Fitotecnia do Campus IV da Universidade Estadual da Paraíba, no município de Catolé do Rocha, Sertão Paraibano.

Os quatro lotes de sementes de linhaça marrom, foram doados pelo Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas - RS.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, utilizando-se quatro lotes de sementes de linhaça marrom e as sementes foram submetidas a quatro períodos de embebição para o teste do pH do exsudato (30; 60, 90 e 120 minutos) perfazendo um total de 16 tratamentos com três repetições compostas por 50 sementes.

TRATAMENTOS:

T1= L1+30 min	T5= L2+30 min	T9= L3+30 min	T13= L4+30 min
T2= L1+60 min	T6= L2+60 min	T10= L3+60 min	T14= L4+60 min
T3= L1+90 min	T7= L2+90 min	T11= L3+90 min	T15= L4+90 min

T4= L1+120 min T8= L2+120 min T12= L3+120 min T16= L4+120 min

Variáveis analisadas:

✓ **Grau de Umidade (GU%):** foram utilizadas duas subamostras de dois gramas de sementes, pelo método da estufa a 105°C ± 3°C, durante 24 horas, de acordo com as Regras para Análise de Sementes – RAS (BRASIL, 2009) e os resultados expressos em percentagem (base úmida).

✓ **Teste de Primeira Contagem de Germinação (PCG %):** foi conduzido conjuntamente com o teste padrão de Germinação, com três repetições de 50 sementes, distribuídas sobre papel Germitest, umedecidas com água destilada, equivalente a duas vezes e meia o peso do substrato seco. Foram imediatamente levadas para germinar a temperatura constante de 20°C. As avaliações foram realizadas no terceiro dia após a semeadura, computando-se as plântulas normais germinadas (BRASIL, 2009), sendo os resultados expressos em percentagem média de plântulas normais.

✓ **Teste de Germinação (G %):** conduzido com três repetições de 50 sementes, distribuídas sobre papel Germitest, umedecidas com água destilada, equivalente a duas vezes e meia o peso do substrato seco. Foram imediatamente levadas para germinar a temperatura constante de 20°C. As avaliações da germinação das sementes foram realizadas aos três e aos sete dias após a semeadura, computando-se as plântulas normais germinadas (BRASIL, 2009), sendo os resultados expressos em percentagem média de plântulas normais.

✓ **Peso de Mil Sementes (PMS g):** esta avaliação foi realizada em oito repetições de cem sementes de acordo com as Regras para Análises de sementes **(**BRASIL, 2009**).**

✓ **Comprimento de plântulas (CP cm):** Foram utilizadas três repetições de 10 sementes de linhaça. Uma linha foi traçada no terço superior do papel Germitest no sentido longitudinal, em seguida foram umedecidos previamente com água destilada equivalente a 2,5 vezes a massa seca do papel. Os rolos foram acondicionados em sacos plásticos posicionados verticalmente na câmara tipo BOD por sete dias a 20°C. Ao final deste período, foi efetuada a medida das partes das plântulas normais emergidas (raiz primária e hipocótilo) utilizando-se uma régua. Os resultados médios por plântulas foram expressos em centímetros.

✓ **Massa Fresca de Plântulas (MF g):** realizado através de três repetições de 10 plântulas inteiras com parte aérea e raízes. Após a medição realizou-se a pesagem em uma balança analítica de precisão digital, sendo os resultados expressos em gramas.

✓ **Massa Seca de Plântulas (MS g)**: Foi realizado através de três repetições de 10 plântulas inteiras com parte aérea e raízes. Após a coleta as plântulas foram colocadas em estufa a 65±3°C, durante 72 horas, quando atingiram peso constante.

✓ **Emergência de Plântulas em Areia (EPA%):** avaliada em dez subamostras de 50 sementes, distribuídas em bandejas de poliestireno com células individuais, preenchidas com areia lavada e esterilizada, as irrigações foram efetuadas sempre que necessário. Aos vinte dias após a semeadura computou-se o número de plântulas normais emergidas e os resultados expressos em percentagem.

✓ **Teste do pH do exsudato das sementes:** No teste de pH do exsudato, cada célula recebeu 2 mL de água destilada, mantendo as sementes submersas. Após os períodos de embebição (30, 60, 90 e 120 minutos) em BOD a 30 °C, adicionou-se uma gota de solução contendo carbonato de sódio (1,8 g L^{-1}) e fenolftaleína (0,5 %). A avaliação foi realizada por comparação visual da coloração com solução padrão (sem semente), classificando-se como viáveis as sementes com coloração rosa intensa e não viáveis aquelas com coloração fraca ou incolor.

✓ **Procedimento Estatístico:** o delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com três repetições, os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F, as médias comparadas pelo teste de Tukey (5%) e de forma complementar realizou-se a correlação linear (r) entre as variáveis analisadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resumo da análise de variância é apresentado na Tabela 1, onde observa-se que houve, para a maioria das variáveis avaliadas diferenças significativas entre os quatro lotes de sementes (exceção para umidade, comprimento de plântula e pH do exsudato de sementes embebidas por 120 minutos), mostrando a sensibilidade destes testes na detecção de diferenças de qualidade entre os lotes de sementes de linhaça marrom avaliados.

Tabela 1 - Resumo da análise de variância pelo valor do quadrado médio. Catolé do Rocha-PB, 2025.

	Significância dos quadrados médios											
Fonte de Variação	PMS	MFP	MSP	U	PCG	G	EPA	CP	pH 30	pH 60	pH 90	pH 120
	.....g.....			.....%.....				.....cm.....	.....%.....			
Lotes	0,79**	0,0009**	0,000012**	0,02ns	155,33**	184,30**	270,44**	0,22ns	188,30**	43,66**	16,22*	73,41ns
Resíduo	0,02	0,0001	0,000001	0,01	18,25	3,50	11,91	0,07	5,91	5,33	3,50	22,75
Média Geral	6,24	0,2458	0,012333	8,08	84,00	87,91	93,66	5,67	88,25	89,83	94,33	90,25
Desvio Padrã	0,15	0,0104	0,001224	0,11	4,27	1,87	3,45	0,27	2,43	2,30	1,08	4,76
CV (%)	2,51	4,23	9,93	1,39	5,08	2,12	4,04	4,87	2,75	2,57	1,98	5,28

** significativo ao nível de 1% probabilidade; * significativo ao nível de 5% probabilidade; CV= Coeficiente de Variação (%).

Fonte: Autores, 2025.

As variáveis Peso de Mil Sementes, Massa Fresca e Massa Seca de Plântulas apresentaram diferenças significativas ($p < 0,001$), indicando variação entre os lotes quanto ao tamanho e à biomassa, refletindo diferentes níveis de reservas e influenciando o vigor inicial. Em contrapartida, o grau de umidade não diferiu entre os lotes, com baixo coeficiente de variação, evidenciando uniformidade hídrica.

As variáveis Primeira Contagem de Germinação, Germinação e Emergência de Plântulas em Areia também apresentaram diferenças significativas ($p < 0,01$), indicando variações na capacidade e velocidade de germinação. Apesar da alta germinação média (87,91%), os elevados valores de quadrado médio para PCG e EPA evidenciam diferenças no vigor e na uniformidade de emergência, características importantes no desempenho inicial das plântulas.

Os dados médios dessas variáveis, bem como do comprimento de plântulas e do teste de pH do exsudato em diferentes períodos de embebição, estão apresentados na Tabela 2.

O lote L4 destacou-se com maior Peso de Mil Sementes (6,84 g), diferindo dos demais, enquanto L2 e L3 apresentaram valores intermediários e L1 o menor peso. Esses resultados estão dentro da faixa descrita para a cultura e reforçam a superioridade fisiológica do lote L4.

Tabela 2 - Dados médios das variáveis. Catolé do Rocha-PB, 2025.

Variáveis	Lotes				DMS (%)
	1	2	3	4	
PMS g	5,59 c	6,26 b	6,28 b	6,84 a	0,41
MFP g	0,26 a	0,26 a	0,22 b	0,24 ab	0,02
MSP g	0,013 ab	0,014 a	0,010 b	0,011 b	0,003
U %	8,07 a	8,01 a	8,22 a	8,05 a	0,29
PCG%	75,66 b	80,66 ab	91,66 a	88,00 a	11,17
G %	77,00 c	87,66 b	92,33 ab	94,66 a	4,89
EPA%	74,66 b	80,00 b	93,00 a	93,66 a	9,02
CP cm	5,66 a	5,30 a	5,93 a	5,80 a	0,72
pH 30%	77,00 c	88,00 b	92,00 ab	95,66 a	6,36
pH 60%	85,00 b	89,00 ab	91,33 a	94,00 a	6,03
pH 90%	93,33 ab	91,66 b	95,33 ab	97,00 a	4,89
pH 120%	87,66 a	88,00 a	87,66 a	97,66 a	12,47

Médias seguidas de mesma letra, minúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey (P>0,05), DMS = Diferença mínima significativa.

Fonte: Autores, 2025.

As Massas Fresca e Seca de plântulas apresentaram comportamento diferenciado na discriminação dos lotes quanto à qualidade fisiológica. Em contrapartida, o grau de umidade não diferiu entre os lotes (8,01% a 8,22%), indicando uniformidade hídrica, conforme observado por Johann et al. (2019).

A Germinação de todos os lotes superou o mínimo exigido para comercialização (70%), enquanto a Emergência de Plântulas em Areia apresentou valores ligeiramente inferiores. O comprimento de plântulas não permitiu a separação dos lotes, corroborando baixa sensibilidade dessa variável na estratificação do vigor.

O teste de pH do exsudato mostrou-se eficiente na diferenciação dos lotes aos 30 minutos de embebição, apresentando rápida estimativa de viabilidade e vigor, em concordância com estudos em diversas espécies (Amaral; Peske, 1984; Fernandes *et al.*, 1987; Theodoro *et al.*, 2018; Araújo, 2009). Entretanto, períodos mais longos comprometeram sua eficiência, com superestimação aos 90 minutos e perda de capacidade de ranqueamento aos 120 minutos, possivelmente devido à maior liberação de exsudatos em sementes pequenas, como a linhaça.

4 CONCLUSÃO

Os testes de germinação, primeira contagem e emergência em areia foram eficientes na diferenciação do potencial fisiológico dos lotes de sementes de linhaça, destacando-se o lote L4 como de maior qualidade e o lote L1 como o de menor desempenho.

O teste de pH do exsudato, especialmente nos períodos de 30 e 60 minutos de embebição, demonstrou elevada eficiência na estimativa rápida do vigor e viabilidade das

sementes, apresentando forte associação com variáveis fisiológicas tradicionais.

Dessa forma, o teste de pH do exsudato se consolida como uma ferramenta prática, rápida e de baixo custo, com potencial para complementar métodos convencionais na avaliação da qualidade de sementes de linhaça.

REFERÊNCIAS

AMARAL, A. S.; PESKE, S. T. pH do exsudato para estimar, em 30 minutos, a viabilidade de sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, Passo Fundo, v. 6, n. 3, p. 85–92, 1984.

ARAÚJO, A. M. **Estudo do tempo de embebição utilizado na técnica de pH de exsudato para a verificação de viabilidade de sementes de *Acacia polyphylla* DC**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília: MAPA/ACS, 2009.

COSMO, B. M. N. Linhaça (*Linum usitatissimum* L.): características e aplicações. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, p. 189–196, 2014.

CUSTÓDIO, C. C. Testes rápidos para avaliação do vigor em sementes: uma revisão. **Colloquium Agrariae**, Presidente Prudente, v. 1, n. 1, p. 29–41, 2005.

FACCO, M. G.; TISCHER, J. S. Avaliação da germinação e vigor em sementes de soja (*Glycine max* L.). **Anais de Agronomia**, v. 1, n. 2, p. 37–53, 2022.

FERNANDES, E. J.; SADER, R. J.; CARVALHO, N. M. Viabilidade de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) pelo pH do exsudato. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 9, n. 3, p. 69–75, 1987.

FESSEL, S. A. *et al.* Teste de condutividade elétrica em sementes de soja. **Bragantia**, v. 69, n. 1, p. 207–214, 2010.

FRANÇA-NETO, J. B. et al. Ocorrência de contaminantes em sementes de soja. *In:* REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO CENTRAL DO BRASIL, 31., 2010, Brasília. **Resumos...** Londrina: Embrapa Soja, 2010. p. 467–469.

HILST, P. C. *et al.* Test of exudates for coffee seeds. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 34, n. 2, p. 212–217, 2012.

JOHANN, A. K. *et al.* Qualidade fisiológica de sementes de linho. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 16, n. 29, p. 323–328, 2019.

KRZYZANOWSKI, F. C.; FRANÇA-NETO, J. B.; HENNING, A. A. **A alta qualidade da semente de soja**. Londrina: Embrapa, 2018.

OLIVEIRA, M. R. *et al.* Fertirrigação da cultura de linhaça. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 1, p. 22–32, 2012.

RECH, E. G. **Contribuição do teste do pH do exsudato**. Campina Grande: Realize, 2021.

SANTOS, J. F. *et al*. Potencial fisiológico de sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 33, n. 4, p. 743–755, 2011.

SOUZA, C. R.; OHLSON, O. C.; PANOBIANCO, M. Avaliação da viabilidade de sementes. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 32, n. 4, p. 174–180, 2010.

THEODORO, J. V. C. *et al*. Teste do pH do exsudato. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 31, n. 3, p. 667–673, 2018.

CAPÍTULO 10

ESPAÇAMENTO DE PLANTIO E MÉTODOS DE POLINIZAÇÃO NO DESEMPENHO DE ABÓBORA HÍBRIDA TETSUKABUTO EM REGIÃO DE ALTITUDE DA BAHIA

Sabrina Rocha Silva
Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB, Brasil

Juliana Araújo da Silva
Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB, Brasil

Tainá Ferreira de Sousa
Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB, Brasil

Guilherme Cesar de Brito Lordelo
Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB, Brasil

Raquel Cardoso Guimarães
Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB, Brasil

Luís Vicente Teixeira Lima
Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB, Brasil

Henrique Ribeiro Novais
Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB, Brasil

Jaime Silva Barboza Neto
Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB, Brasil

Hérica França dos Santos
Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB, Brasil

Gisele Brito Rodrigues
Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB, Brasil

DOI: 10.52832/wed.221.1307

Resumo: A abóbora (*Cucurbita spp.*) possui grande relevância na alimentação de diversas populações no Brasil. A polinização é essencial na abóbora, mas a redução de polinizadores limita a produção. No híbrido Tetsukabuto, a macho-esterilidade exige polinização cruzada ou uso de 2,4-D para a produção dos frutos. Além disso, supõe-se que um maior espaçamento reduz a competição por recursos e pode aumentar a emissão de flores. Diante disso, com este trabalho objetivou-se avaliar o efeito de diferentes espaçamentos de plantio e métodos de polinização sobre o desempenho agronômico do híbrido Tetsukabuto. O experimento foi conduzido em delineamento fatorial 3 × 2, com três espaçamentos: 3,5 × 1,0 m; 4,5 × 1,5 m; e 5,0 × 1,5 m, e dois métodos de polinização: aplicação de solução à base de 2,4-D (MP1) e polinização natural com uso da cultivar 'Jacarezinho' como bordadura (MP2). Os resultados indicaram que não houve efeito significativo dos espaçamentos avaliados sobre as variáveis analisadas. Por outro lado, o fator polinização apresentou influência significativa no desempenho da cultura. A polinização artificial MP1 proporcionou maior peso de frutos, enquanto o uso da cultivar 'Jacarezinho' como polinizadora resultou em maior número de flores.

Palavras-chave: Competição. Florescimento. Hormônio.

1 INTRODUÇÃO

A abóbora (*Cucurbita* spp.) tem grande importância na alimentação básica de diversas populações no Brasil. Dados recentes indicam que na CEAGESP foram comercializadas 31.171,74 toneladas desta hortaliça, evidenciando a sua relevância no setor de produtos hortícolas (CEAGESP, 2024).

O cultivo de híbridos interespecíficos desta cultura, principalmente a cultivar de abóbora japonesa 'Tetsukabuto', é uma prática bastante difundida no Brasil e tem sido uma alternativa rentável aos produtores, quando comparada a exploração de abóboras comuns (Ferreira *et al.*, 2017). Essa vantagem está diretamente relacionada às características superiores de seus frutos em comparação às cultivares de polinização aberta, como a precocidade (ciclo entre 95 e 110 dias), maior resistência à broca dos frutos, estabilidade produtiva e uniformidade quanto ao tamanho e à coloração, com casca verde-escura e polpa alaranjada (Miranda *et al.*, 2018, p. 521). Nesse sentido, a adoção de práticas de manejo adequadas torna-se fundamental para expressar esse potencial produtivo, uma vez que diferentes materiais genéticos podem apresentar respostas distintas em termos de produtividade, especialmente em função da proporção de ramas e da capacidade de crescimento vegetativo de cada genótipo (Filgueira, 2007, p. 361), bem como diferentes respostas quanto às condições edafoclimáticas locais. Assim, o espaçamento entre plantas destaca-se como um dos principais fatores de manejo, desempenhando papel essencial na eficiência do aproveitamento da luz e no equilíbrio entre o crescimento vegetativo e a produção de frutos (Cordeiro, 2016).

Ademais, a polinização é um fator essencial para a produção desta cultura, sendo predominantemente realizada por insetos. No entanto, a redução das populações de polinizadores,

associada a alterações ambientais e a práticas agrícolas, têm comprometido a produtividade dessas espécies (Andrade, 2020, p. 3328).

As cucurbitáceas apresentam, de modo geral, expressão sexual monóica, produzindo flores masculinas e femininas no mesmo indivíduo. Na abóbora tipo Tetsukabuto, é comum que a produção de flores masculinas seja reduzida ou até ausente no período de abertura das flores femininas. Por essa razão, as plantas são consideradas funcionalmente macho-estéreis, tornando necessário o cultivo consorciado com outra espécie que atue como fornecedora de pólen, garantindo a ocorrência da polinização cruzada (Nomura, 2024, p. 12056). Nesse contexto, estratégias alternativas, como o uso de fitorreguladores, têm se destacado por possibilitar a substituição da polinização natural, promovendo a frutificação por meio de hormônios sintéticos, como o 2,4-D. O que reduz a dependência de polinizadores e dispensa o plantio de cultivares polinizadoras, que normalmente ocupam de 15% a 20% da área cultivada, além de minimizar os impactos de condições climáticas adversas sobre a atividade das abelhas (Miranda *et al.*, 2018, p. 521). O aumento do espaçamento entre plantas também pode influenciar diretamente a produção de flores em culturas de abóbora, uma vez que proporciona menor competição intraespecífica por recursos como luz, água e nutrientes (Águas, 2023). Nessas condições, as plantas tendem a apresentar maior desenvolvimento vegetativo e, consequentemente, maior emissão de flores por planta.

Nessa perspectiva, o presente estudo tem como objetivo avaliar o efeito de diferentes espaçamentos de plantio e métodos de polinização sobre a produtividade e o desempenho agronômico do híbrido Tetsukabuto em Vitória da Conquista, região de altitude da Bahia.

2 METODOLOGIA

O experimento foi conduzido no Campo Agropecuário da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), localizado no município de Vitória da Conquista, BA, Brasil (14°51'57" S e 40°50'20" O), a 923 m de altitude. As mudas foram produzidas em bandejas de plástico com 50 células, preenchidas com substrato comercial e transplantadas aos 30 dias após o semeio. O transplantio das mudas foi realizado em 15 de setembro de 2025, e a colheita ocorreu em 15 de dezembro de 2025. A cultura foi implantada com a utilização da cultivar híbrida de abóbora do tipo japonesa 'Tetsukabuto' F1, sendo as sementes provenientes da empresa Agrocinco. O delineamento experimental adotado foi em esquema fatorial 3 × 2, correspondente a três espaçamentos entre plantas e dois métodos de polinização.

Cada parcela experimental foi constituída por uma linha contendo dez plantas. Foram avaliados três espaçamentos: E1 (3,5 × 1,0 m), E2 (4,5 × 1,5 m) e E3 (5,0 × 1,5 m), correspondentes

às distâncias entre linhas e entre plantas. O segundo fator avaliado correspondeu aos métodos de polinização. No primeiro método, realizou-se polinização artificial (MP1) mediante aplicação de solução à base de 2,4-D (ácido 2,4-diclorofenoxiacético). A solução foi preparada utilizando 1,0 ml de 2-4-D para 5 L de água. A aplicação foi realizada diretamente na parte interna das flores, com auxílio de um borrifador, utilizando-se aproximadamente 2,0 mL de solução por flor, no período da manhã entre 6 e 8 h. O procedimento foi conduzido no período de 11 de setembro de 2025 a 19 de outubro de 2025, totalizando 40 dias de polinização. Durante esse período, foi contabilizado o número de flores polinizadas por planta.

No segundo método (MP2), adotou-se a polinização natural, com o uso de linhas de bordadura constituídas pela cultivar de abóbora 'Jacarezinho', semeadas 20 dias antes da implantação da cultura principal, com o objetivo de sincronizar o florescimento entre as cultivares e favorecer a polinização cruzada.

O espaçamento utilizado para cultivar Jacarezinho foi de 2,5 × 1,5 m. Durante o período de avaliação, nessa área também foi realizada a contagem do número de flores femininas da cultura principal. Os tratamentos referentes aos diferentes métodos de polinização foram conduzidos em áreas separadas, a fim de evitar a ocorrência de polinização cruzada entre os sistemas avaliados, sendo a área 1 destinada ao tratamento MP1 e a área 2 ao tratamento MP2.

Nas áreas experimentais, foram coletadas amostras de solo na camada de 0–20 cm de profundidade, sendo posteriormente analisadas no Laboratório de Análise de Solos da UESB, cujos resultados são apresentados a seguir: Área 1: pH (H_2O) 6,2; Ca^{2+} = 4,1 cmolc dm^{-3}; Mg^{2+} = 1,1 cmolc dm^{-3}; K^+ = 0,05 cmolc dm^{-3}; P = 46,8 mg dm^{-3}; Na^+ = 0,00 cmolc dm^{-3}; Al^{3+} = 0,1 cmolc dm^{-3} ;V = 72% e M.O.= 33,8 g dm^{-3}. Área 2: pH (H_2O) 5,7; Ca^{2+} = 2,1 cmolc dm^{-3}; Mg^{2+} = 0,9 cmolc dm^{-3}; K^+ = 0,02 cmolc dm^{-3}; P = 39,6 mg dm^{-3}; Na^+ = 0,00 cmolc dm^{-3}; Al^{3+} = 0,1 cmolc dm^{-3}; V = 58% e M.O.= 21,7 g dm^{-3}. A adubação de base e de cobertura foi realizada segundo recomendação da cultura de acordo com o manual Recomendações para o Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação, com adaptações e baseado na análise de solo da área. A adubação de plantio consistiu na aplicação de 450 kg ha^{-1} de P_2O_5, utilizando-se fosfato monoamônico (MAP) como fonte. A adubação nitrogenada foi realizada com 250 kg ha^{-1} de N, na forma de uréia, parcelada em três aplicações: 33% no plantio, 33% em cobertura aos 20 dias após o transplante (DAT) e 33% aos 40 DAT. Para o potássio, aplicaram-se 200 kg ha^{-1} de K_2O, tendo como fonte o cloreto de potássio (KCl), sendo 50% no plantio, 25% aos 20 DAT e 25% aos 40 DAT. Os micronutrientes foram fornecidos na dose de 1 kg ha^{-1} de boro (B), na forma de ácido bórico, e 3 kg ha^{-1} de zinco (Zn), na forma de sulfato de zinco.

O manejo fitossanitário foi conduzido conforme a necessidade, de acordo com as recomendações técnicas para a cultura, utilizando-se produtos fitossanitários devidamente registrados.

A colheita foi realizada aos 90 dias após o transplantio, sendo determinado o peso médio dos frutos e o número de flores. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA), visando avaliar os efeitos dos fatores espaçamento e método de polinização, bem como a interação entre eles (fatorial duplo 3x2). As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do Sisvar®, e, quando verificada significância, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 1 mostra o resumo da análise variância, na qual não evidenciou interação significativa entre os fatores espaçamento e polinização, indicando independência entre seus efeitos. Observou-se efeito significativo apenas para o fator polinização, conforme demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1 –Resumo da análise de variância (ANOVA) para os efeitos de espaçamento e método de polinização e sua interação.

FV	GL	Peso de Frutos (F)	N° de Flores (F)	Peso de Frutos (*p*-valor)	N° de Flores (*p*-valor)
Polinização	1	19,699	74,824	0,0000	0,0000
Espaçamento	3	1,731	1,595	0,1647	0,1947
Polinização x Espaçamento	3	0,628	0,664	0,5984	0,5756
Erro	112	-	-	-	-
Total	119	-	-	-	-

A anova foi feita a 0,005% de significância

Dessa forma, procedeu-se à análise dos efeitos isolados, cujas médias foram comparadas pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade (Tabela 2). Na comparação entre os métodos de polinização, verificou-se diferença significativa entre os tratamentos para as variáveis avaliadas. A polinização artificial (MP1) apresentou maior peso de frutos, enquanto a polinização com jacarezinho (MP2) resultou em maior número de flores.

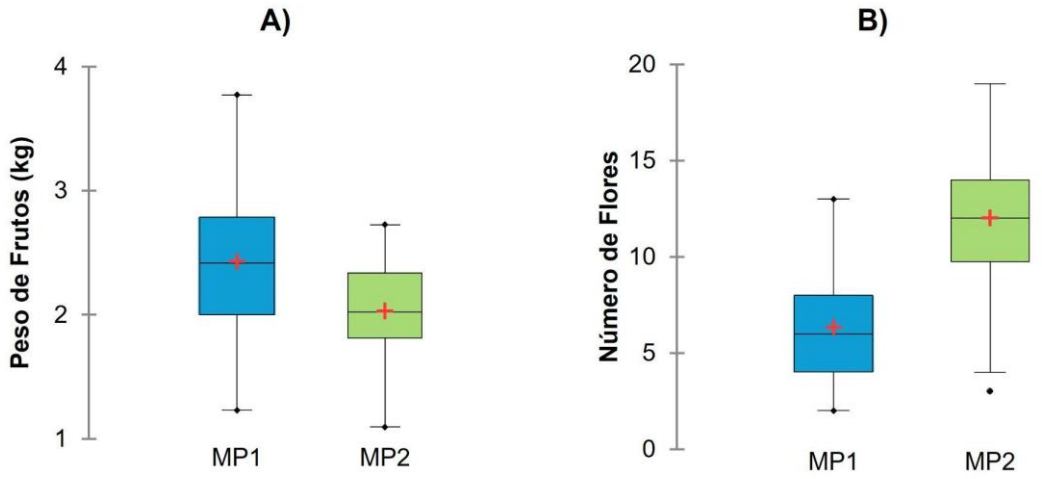
Tabela 2 – Médias de peso de frutos e número de flores em função dos métodos de polinização.

Polinização	Peso de frutos (Kg)	N° de flores
MP1	2,44 ± 0,59 **a**	6,33 ± 2,69 **b**
MP2	2,04 ± 0,38 **b**	12,03 ± 4,35 **a**

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os resultados observados na Tabela 2 são consistentes com a distribuição dos dados apresentada na Figura 1, na qual se verifica maior concentração de valores de peso de frutos para MP1 e maiores valores de número de flores para MP2.

Figura 1 – *Box plot* do peso de frutos e do número de flores em função dos métodos de polinização.



*(A) Peso de frutos (kg) e (B) número de flores sob polinização natural (MP1) e polinização com jacarezinho (MP2). As caixas representam o intervalo interquartil, a linha central indica a mediana, os bigodes correspondem à amplitude dos dados e o símbolo (+) representa a média.

Fonte: Autores, 2026.

O maior peso de frutos verificado em MP1 pode estar associado ao uso de reguladores de crescimento, como o 2,4-D, que, segundo Franco (1999), pode promover incrementos significativos na produtividade de frutos de abóbora, corroborando os resultados de Ferreira (2017), que observaram aumento no peso médio dos frutos com a aplicação de 2,4-D na dose de 225,0 mg L^{-1} resultou em aumento no peso médio dos frutos colhidos.

MP2 apresentou maior número de flores e menor peso de frutos. Nesse contexto, a utilização de abóbora jacarezinho como planta polinizadora pode ter contribuído para a formação de um ambiente mais favorável à atividade de polinizadores, devido ao aumento da diversidade e da disponibilidade de recursos florais na área. Além disso, a distribuição espacial das plantas e dos recursos florais pode modificar o comportamento de forrageamento dos insetos, favorecendo a

visitação mesmo em condições de menor densidade de cultivo (De Lima Lucena, 2025). O processo da polinização é influenciado por fatores bióticos, como a diversidade, abundância e comportamento dos polinizadores, que afetam diretamente a taxa de visitação floral, o transporte eficiente de pólen e o ciclo reprodutivo das plantas (Arachchige, 2022, p. 50). Entretanto, embora o maior número de flores observado em MP2 indique potencial produtivo, o bom rendimento depende não apenas da emissão floral, mas também da eficiência da polinização e do pegamento dos frutos. Falhas nesse processo podem comprometer a qualidade dos frutos e aumentar a taxa de aborto floral (Santos, 2019). Ademais, fatores climáticos, como temperatura, umidade e precipitação, exercem influência direta na eficiência da polinização em cucurbitáceas (De Lima Lucena, 2025). Dessa forma, é possível que, apesar da maior produção de flores em MP2, limitações na polinização efetiva tenham resultado em menor desenvolvimento e, consequentemente, menor peso dos frutos.

4 CONCLUSÃO

O espaçamento não interferiu nas variáveis analisadas, entretanto, o uso da polinização artificial resultou em maior peso médio de frutos da abóbora Tetsukabuto, resultando em incremento de produtividade.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Fabrício Ribeiro et al. Pollination techniques in zucchini production in the presence of boron fertilization. **Comunicata Scientiae**, v. 11, p. e3328-e3328, 2020.

ARACHCHIGE, E. CWS et al. A global assessment of the species composition and effectiveness of watermelon pollinators and the management strategies to inform effective pollination service delivery. **Basic and Applied Ecology**, v. 66, p. 50-62, 2023. Doi: 10.1016/j.baae.2022.11.006.

CORDEIRO, C. J. X. **Desempenho agronômico de abobrinha italiana em função do espaçamento entre plantas**. 2016.

DE ÁGUAS, J. A. O. de; SILVA, S.; DA SILVA, T. D. **Abóbora híbrido irrigada cultivada sob diferentes densidades de plantio e adubação de cobertura**, 2023.

DE LIMA LUCENA, J. **Melancia: o papel das abelhas na polinização watermelon: the role of bees in pollination**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, v. 2 - Ano 2025.

FERREIRA, T. A. *et al.* Indução da frutificação paternocárpica de frutos em híbrido de abóbora japonesa com 2, 4-d sob condições de temperatura elevada. **Nucleus** (16786602), v. 14, n. 1, 2017.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças / Fernando Antonio Reis Filgueira**. – 3. ed. rev. e ampl. – Viçosa, MG: Ed. UFV, 2007. 361p.

FRANCO, M. 1999. Abóboras: fitohormônio aumenta a produção. **Suplemento do Campo do Jornal de Brasília**. Ano 12, n. 594.

MIRANDA, F. F. R. *et al.* Agronomic characteristics of pumpkin fruits of-Tetsukabuto-hybrid as a functionof 2,4-D doses. **Comunicata Scientiae**, v. 8, p. 521-525, 2018.

NOMURA, M. et al. Frutificação de abóbora híbrida "Tetsukabuto" sob aplicação de 2,4-D. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 13, p. e12056, 2024.

RESENDE G. M. *et al.* Produtividade da cultura da abóbora e diferentes densidades de plantio no Vale do São Francisco. **Horticultura Brasileira**, v. 31, p. 504-508, 2013.

RIBEIRO, A. C. *et al.* (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359 p.

SANTOS, G. L. dos *et al.* **Fitomassa da planta e caracterização físico-química de abóbora produzida com aplicação de citocinina e auxina**. 2019.

CAPÍTULO 11

TRATAMENTOS ALTERNATIVOS NO MANEJO DE FUNGOS ASSOCIADOS ÀS SEMENTES DE FEIJÃO CAUPI (*Vigna unguiculata* L.)

Samuel Herculano Barros
Faculdade Rebouças de Campina Grande, Brasil

Dean Henrique Alves de Oliveira
Faculdade Rebouças de Campina Grande, Brasil

Philipe Mendes de Andrade
Faculdade Rebouças de Campina Grande, Brasil

Dielândio Silva Monteiro
Faculdade Rebouças de Campina Grande, Brasil

Wanderley Guimarães Gurjão
Faculdade Rebouças de Campina Grande, Brasil

João Anderson Oliveira Nunes
Faculdade Rebouças de Campina Grande, Brasil

Paula Karolynny Souto Leite
Faculdade Rebouças de Campina Grande, Brasil

Razurick Shenia Dos Santos Pessoa
Faculdade Rebouças de Campina Grande, Brasil

Gabriela Barbosa de Freitas Monteiro
Universidade Federal da Paraíba, Brasil

Robson Eduardo Pereira Monteiro
Faculdade Rebouças de Campina Grande; Universidade Federal da Paraíba, Brasil

DOI: 10.52832/wed.221.1308

Resumo: O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.) é uma leguminosa de grande relevância socioeconômica para as regiões Norte e Nordeste do Brasil, contudo sua produtividade média é frequentemente limitada por fitopatógenos transmitidos via semente's. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de diferentes tratamentos biológicos, botânico e químico na qualidade sanitária de sementes de feijão-caupi. Foram utilizadas sementes adquiridas de produtores familiares do município de Gado Bravo-PB. Foram utilizadas 200 sementes para cada tratamento, sendo distribuídas em 10 repetições de 20 sementes. Foi realizada a assepsia das sementes em solução com hipoclorito de sódio a 1% e em seguida submetidos aos tratamentos. Foram utilizados seis tratamentos: Testemunha (Água Destilada Esterilizada), Captana® (2,4 g/ 1kg de semente), Trichodermil® (2 mL/100 mL de água), Extrato de alho (10 mL/100 mL de água), Canindé® (3 g/100 mL de água) e Bioimune® (3 g/100 mL de água), as sementes ficaram submersas em cada tratamento por cinco minutos. A avaliação sanitária foi realizada pelo método de papel filtro (Blotter test), onde as sementes foram incubadas a 25 ± 2 °C com fotoperíodo de 12 horas por sete dias. Na análise da incidência geral do lote, constatou-se elevada contaminação por *Aspergillus* spp. (97%), *Fusarium* spp. (90%), *Penicillium* sp. (73%) e *Cladosporium* sp. (67%). O tratamento químico convencional com Captana® demonstrou controle absoluto, zerando todas as colônias fúngicas. Entre as alternativas sustentáveis, o Bioimune® apresentou a maior eficiência no controle de *Fusarium* spp., reduzindo a infecção para apenas 6 sementes (frente a 39 da testemunha), seguido pelo Extrato de alho (9 sementes) e pelo Canindé® (12 sementes). Adicionalmente, os tratamentos com Extrato de alho, Canindé® e Bioimune® foram totalmente eficazes na erradicação dos gêneros *Colletotrichum* sp., *Chaetomium* sp. e *Curvularia* sp.. Conclui-se que o controle químico com Captana® possui eficiência máxima, e que os produtos biológicos Bioimune® e Canindé®, somados ao Extrato de alho a 10%, consistem em alternativas biológicas e botânicas viáveis e promissoras para o manejo sanitário de sementes de feijão-caupi.

Palavras-chave: Biocontrole. Extrato botânico. Fitopatologia.

1 INTRODUÇÃO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.), pertencente à família Fabaceae, é uma das leguminosas mais cultivadas e consumidas nas regiões Nordeste e Norte do Brasil, destacando-se como um alimento base e uma importante fonte de proteína e renda (Rocha *et al.*, 2021). O seu cultivo é caracterizado pela grande adaptabilidade a sistemas de agricultura familiar, embora venha expandindo-se significativamente para sistemas tecnificados sob irrigação e safrinha no Cerrado brasileiro (Freire Filho *et al.*, 2017).

O Brasil figura entre os principais produtores mundiais de feijão-caupi. Entretanto, a produtividade média da cultura ainda é considerada baixa, sendo frequentemente limitada pela ocorrência de diversas doenças causadas por fitopatógenos, como fungos, bactérias e vírus, que comprometem severamente a qualidade dos grãos e o rendimento final da lavoura (Assunção *et al.*, 2023).

Dentre os principais problemas sanitários que afetam o feijão-caupi, destacam-se as doenças fúngicas transmitidas por sementes, como a antracnose, causada por *Colletotrichum lindemuthianum*, o crestamento fúngico e o tombamento de plântulas (damping-off), provocados por

complexos de fungos como *Fusarium* spp., *Rhizoctonia solani* e *Macrophomina phaseolina* (Medeiros *et al*., 2020). Esses patógenos atacam desde as fases iniciais de germinação até o desenvolvimento das plantas, provocando lesões necróticas e podridões radiculares.

A semente é a principal via de introdução e disseminação desses patógenos em novas áreas produtoras (Machado, 2020). Dessa forma, a manutenção da qualidade sanitária das sementes é um fator fundamental para o planejamento da produção, pois patógenos associados às sementes podem afetar diretamente o vigor, a taxa de germinação e o estande inicial da cultura no campo (Carvalho; Nakagawa, 2012).

Historicamente, o controle dessas doenças tem sido feito por meio do tratamento químico de sementes com fungicidas sintéticos protetores e sistêmicos. Contudo, a busca por alternativas sustentáveis intensificou-se devido às crescentes preocupações com os impactos ambientais e toxicológicos desses produtos, além do risco de acelerar a pressão de seleção, resultando no surgimento de populações de fitopatógenos resistentes (Pinho *et al*., 2019).

Nesse cenário, o tratamento biológico de sementes e o uso de extratos vegetais surgem como alternativas promissoras (Zonta *et al*., 2022). Essas ferramentas visam o controle de fitopatógenos por meio de agentes antagonistas, como bactérias do gênero *Bacillus* e fungos do gênero *Trichoderma*, ou pelas propriedades antimicrobianas de compostos secundários de plantas, promovendo a sanidade sem agredir o meio ambiente (Medeiros *et al*., 2020).

Com isso, o presente estudo objetivou avaliar o efeito de diferentes tratamentos na qualidade sanitária de sementes de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.), utilizando os produtos comerciais Bioimune (*Bacillus* spp.), Trichodermil (*Trichoderma* spp.), Canindé (*Trichoderma* spp.), o Extrato de Alho a 10% como alternativa botânica, e o fungicida químico Captana.

2 METODOLOGIA

Foram utilizadas sementes de feijão-caupi, cedidas por agricultores familiares do município de Gado Bravo, Paraíba. As sementes adquiridas foram transportadas para o laboratório de fitopatologia para a realização do experimento, sendo essas beneficiadas manualmente e desinfestadas com hipoclorito de sódio a 1% por 3 minutos.

As sementes de *V. unguiculata* foram submetidas aos seguintes tratamentos: T1: Testemunha - Água destilada esterilizada; T2: Captana® (240 g/100 kg de sementes)); T3: Trichodermil® (2 mL 100 mL-¹); T4: Extrato de alho a 10% (10 mL 100 mL-¹); T5: Canindé® (3 g 100 mL-¹); T6: Bioimune® (3 g 100 mL-¹). Para todos os testes as sementes foram imersas nos tratamentos por cinco minutos.

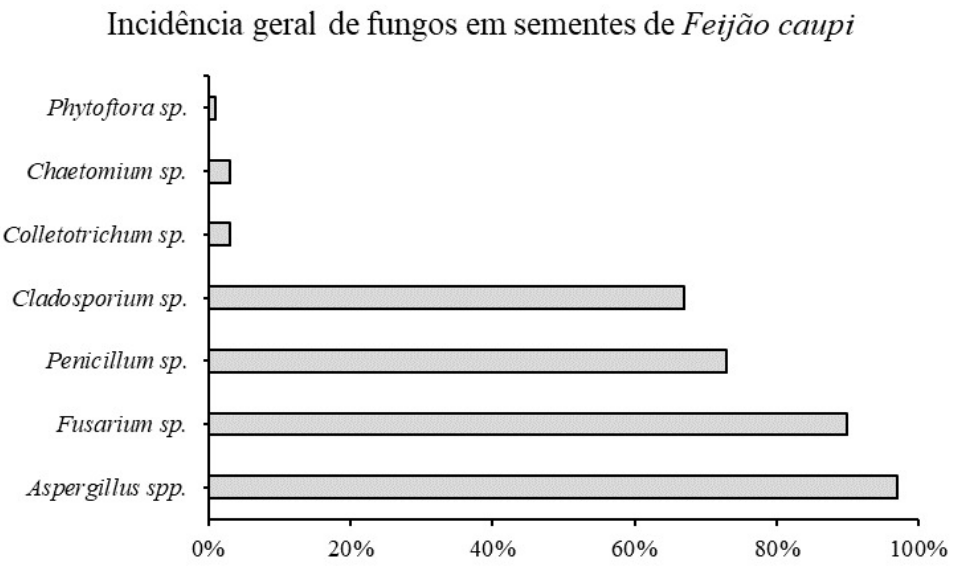
O extrato aquoso de alho (*Allium sativum*) foi preparado na concentração de 10% (peso/volume), utilizando-se 50 g de bulbilhos frescos macerados em 500 mL de água destilada esterilizada. Como agentes adjuvantes, foram adicionados à solução 1 mL de detergente neutro, atuando como espalhante e 1 mL de óleo de soja comercial, atuando como adesivo, visando otimizar a aderência do produto ao tegumento das sementes. Posteriormente, o extrato foi mantido em repouso pelo período de 24 horas em ambiente ausente de luminosidade, procedimento adotado para mitigar a fotodegradação e promover a estabilização e máxima eficiência biológica da alicina. Após o período de repouso, a solução foi filtrada em peneira de malha fina para a retenção de frações sólidas antes da imersão das sementes.

A avaliação sanitária das sementes e a identificação dos patógenos se deu a partir da incubação das sementes em papel filtro "Blotter test" (Brasil, 2009). Foram utilizadas 200 sementes por tratamento, sendo 10 repetições de 20 sementes cada. As sementes tratadas foram dispostas em placas de Petri contendo dupla camada de papel filtro estéril umedecidos com água destilada esterilizada e mantidas sob condições de incubação em temperatura de 25 ± 2°C, sob fotoperíodo de 12 h, durante sete dias. A identificação dos fungos presentes nas sementes foi realizada com auxílio de microscópio óptico, comparando às descrições presentes na literatura (Seifert *et al.*, 2011). Os resultados obtidos foram expressos em porcentagem de sementes infectadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na avaliação da qualidade sanitária, foram identificados diferentes gêneros fúngicos associados às sementes de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.). Ao analisar a incidência geral de fungos nas sementes avaliadas, constatou-se uma elevada contaminação biológica, com nítida predominância do gênero *Aspergillus* spp. (97%) , seguido de perto por *Fusarium* spp. (90%) , *Penicillium* sp. (73%) e *Cladosporium* sp. (67%) , os quais apresentaram as maiores expressões gráficas (Figura 1). Em menores proporções, também foi registrada a ocorrência de *Colletotrichum* sp. (3%), *Chaetomium* sp. (3%) e *Phytophthora* sp. (1%).

Figura 1 – Incidência geral de fungos em sementes de *Vigna unguiculata L.*



Fonte: Autores, 2026.

Os gêneros *Aspergillus* spp. e *Penicillium* spp. destacam-se na literatura fitopatológica como os principais fungos de armazenamento. Embora frequentemente não sejam classificados como patógenos agressivos de campo para as plântulas, os elevados índices observados de *Aspergillus* (97%) e *Penicillium* (73%) exercem um papel crítico na deterioração acelerada dos grãos. A atividade desses microrganismos pode provocar a perda progressiva do vigor, degradação de reservas nutritivas e redução severa na qualidade fisiológica do lote de sementes (Nóbrega; Nascimento, 2020; Pinto, 2021).

Por outro lado, verificou-se uma expressiva taxa de fungos que invadem as estruturas vegetais ainda em campo, com destaque para o gênero Fusarium spp. (90%) . Este patógeno possui a capacidade de sobreviver e permanecer em estado latente nas sementes sem comprometer imediatamente a viabilidade inicial destas. Contudo, sementes infectadas atuam como eficientes vetores de disseminação, transmitindo o fungo para novas áreas agrícolas e infectando as plântulas desde os primeiros estágios de germinação, além de permitir que o fitopatógeno persista no solo por longos períodos (Souza; Nascimento, 2015). Na cultura do feijão-caupi, espécies de *Fusarium* são responsáveis por sérios danos no estande, manchas nos grãos, murchas vasculares e redução drástica do rendimento final (Scheidt *et al.*, 2019), somando-se ao risco iminente de produção de micotoxinas prejudiciais à saúde humana e animal (Toledo, 2018; Prestes *et al.*, 2019).

Em relação à resposta aos tratamentos sanitários testados (Tabela 1), constatou-se uma redução significativa na incidência de *Fusarium* spp. quando comparada ao grupo testemunha, que exibiu 39 sementes infectadas. O tratamento químico convencional com o fungicida (Captana) demonstrou controle total nas condições do experimento, zerando completamente a presença de

todas as colônias fúngicas avaliadas (0 sementes infectadas). Entre as alternativas de base biológica e botânica, o produto comercial Bioimune® demonstrou a maior eficiência no controle de *Fusarium* spp., reduzindo a infecção para apenas 6 sementes, seguido pelo Extrato de alho a 10% (9 sementes infectadas) e pelo Canindé® (12 sementes infectadas). Esses resultados evidenciam o potencial do manejo biológico e do uso de extratos vegetais na supressão de fitopatógenos na cultura.

Tabela 1 – Incidência de fungos em sementes de *Vigna unguiculata L.* tratadas com produtos alternativos.

Tratamento	*Aspergillus* spp.	*Fusarium* spp.	*Colletotrichum* sp.	*Penicillium* sp.	*Chaetomium* sp.	*Curvularia* sp.
Testemunha	46	39	26	24	3	3
Captana®	0	0	0	0	0	0
Trichodermil®	9	24	41	28	0	0
Extrato de alho	12	9	0	4	0	0
Canindé®	18	12	0	13	0	0
Bioimune®	12	6	0	4	0	0

Fonte: Autores, 2026.

De modo geral, as sementes tratadas com os produtos biológicos e o extrato vegetal exibiram uma importante redução na carga fúngica global (Tabela 1). Os tratamentos Extrato de alho, Canindé® e Bioimune® foram plenamente eficazes em erradicar a ocorrência dos gêneros *Colletotrichum* sp., *Chaetomium* sp. e *Curvularia* sp., zerando suas respectivas contagens.

O sucesso observado nos tratamentos biológicos eficientes, como o Bioimune® e o Canindé®, está diretamente relacionado à sua composição biótica (à base de *Bacillus* spp. e isolados específicos de *Trichoderma* spp.), que atuam por meio de múltiplos mecanismos antagônicos diretos, tais como antibiose, competição por espaço e nutrientes, e a liberação de metabólitos secundários voláteis e difusíveis. Essas propriedades bioativas são mimetizadas de forma análoga pelos compostos antimicrobianos (como a alicina) presentes no extrato aquoso de alho.

4 CONCLUSÃO

O controle sanitário de sementes é de fundamental importância para evitar a introdução e a disseminação de fitopatógenos em áreas de produção de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.) onde ainda não há ocorrência dessas doenças. No presente estudo, os tratamentos testados exerceram influência significativa na redução da incidência de fungos nas sementes, destacando-se o tratamento químico convencional com Captana®, que demonstrou eficiência máxima ao inibir completamente a presença de todas as colônias fúngicas avaliadas. Como alternativas sustentáveis e promissoras, os produtos biológicos Bioimune® e Canindé®, associados ao Extrato de alho a

10%, evidenciaram sua viabilidade técnica ao reduzirem drasticamente a incidência de *Fusarium* spp. e erradicarem completamente os gêneros *Colletotrichum* sp., *Chaetomium* sp. e *Curvularia* sp.

Agradecimentos

À Faculdade Rebouças e a todo o seu corpo docente pelo apoio institucional e pedagógico. Ao Laboratório de Fitopatologia (LAFIT/UFPB), pela cessão do espaço físico e de sua estrutura, fundamentais para a realização das análises e o avanço da ciência. Aos agricultores familiares do município de Gado Bravo - PB, pela parceria e fornecimento das sementes de feijão-caupi utilizadas nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, M. R. S.; SARMENTO, W. D.; SANTOS, P. A.; SANTOS, S. F. Controles alternativos aplicados a fitopatologia em sementes. **Revista de Agroecologia no Semiárido**, v. 5, n. 4, p. 14-24, 2021.

ASSUNÇÃO, I. P. *et al.* Doenças do feijão-caupi. *In*: AMORIM, L. *et al.* **Manual de Fitopatologia**: doenças das plantas cultivadas. 6. ed. Ouro Fino: Agronômica Ceres, 2023. v. 2.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para Análise de Sementes**. Brasília: MAPA/ACS, 2009.

CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Sementes**: ciência, tecnologia e produção. 4. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2012.

FREIRE FILHO, F. R. *et al.* **Feijão-caupi no Brasil**: produção, melhoramento genético, avanços e desafios. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

MACHADO, J. C. **Patologia de Sementes**: fundamentos e aplicações. Lavras: Editora UFLA, 2020.

MEDEIROS, E. V. *et al.* Biocontrole de fitopatógenos e indução de resistência em feijão-caupi por microrganismos e extratos vegetais. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 15, n. 3, 2020.

NÓBREGA, F.; NASCIMENTO, W. Fungos de armazenamento e a perda de qualidade fisiológica em sementes de grandes culturas. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 42, n. 1, 2020.
PINTO, N. F. J. A. **Patologia de sementes e grãos armazenados**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2021.

PRESTES, O. D. *et al.* Micotoxinas em grãos e os impactos na segurança alimentar. **Ciência Rural**, v. 49, n. 8, 2019.

ROCHA, M. M. *et al.* **Cadeia produtiva do feijão-caupi no Brasil**: situação atual e perspectivas. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2021.

SCHEIDT, B. T. *et al.* Danos econômicos e manejo de podridões radiculares causadas por *Fusarium* spp. **Summa Phytopathologica**, v. 45, n. 4, 2019.

SEIFERT, K. *et al*. **The Genera of Hyphomycetes**. Utrecht: CBS-KNAW Fungal Biodiversity Centre, 2011.

TOLEDO, A. **Produção de micotoxinas por fungos fitopatógenos**. São Paulo: Editora Acadêmica, 2018.

CAPÍTULO 12

USO DE ÓLEOS ESSENCIAIS NO CONTROLE SUSTENTÁVEL DE INSETOS-PRAGA

Bruno Pereira dos Santos
Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Entomologia e Conservação da Biodiversidade - Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

Victoria Larco Aguilar
Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Entomologia e Conservação da Biodiversidade - Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

Heloize Maia dos Santos
Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Entomologia e Conservação da Biodiversidade- Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

Maria Julia Lopes de Souza Sete
Graduanda, Agronomia, Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

Yasmin Danielli López Riveros
Graduanda, Biotecnologia Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

Pedro Henrique Breda Périgo
Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Entomologia e Conservação da Biodiversidade- Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

Rosilda Mara Mussury
Doutora em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Docente do Programa de Pós-Graduação em nível de Mestrado e Doutorado em Entomologia e Conservação da Biodiversidade, Faculdade de Ciências Biológicas e Ambientais- Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

DOI: 10.52832/wed.221.1309

Resumo: O uso intensivo de inseticidas sintéticos ao longo das últimas décadas tem provocado sérios impactos ambientais e toxicológicos, incluindo contaminação do solo, da água e dos alimentos, além do desenvolvimento de resistência por parte dos insetos-praga. Diante desse cenário, os óleos essenciais vêm sendo estudados como alternativas sustentáveis no manejo fitossanitário, devido às suas propriedades inseticidas, repelentes e fumigantes, associadas à menor persistência ambiental e menor toxicidade quando comparados aos pesticidas convencionais. O presente trabalho teve como objetivo abordar, por meio de uma revisão de literatura, o potencial dos óleos essenciais no controle sustentável de insetos-praga, destacando seus mecanismos de ação, aplicações agrícolas, vantagens e limitações. A pesquisa bibliográfica foi realizada a partir de artigos científicos, livros, capítulos de livros, dissertações e teses obtidos em bases de dados nacionais e internacionais, utilizando os descritores "óleos essenciais", "manejo sustentável", "pragas agrícolas" e "controle alternativo". Os estudos analisados demonstraram que os óleos essenciais apresentam elevada eficiência no controle de diferentes espécies de insetos-praga, atuando principalmente sobre o sistema nervoso, metabolismo respiratório, comportamento e desenvolvimento dos insetos. Compostos como terpenos, fenóis e aldeídos são responsáveis pelos efeitos letais e subletais observados, incluindo repelência, redução alimentar, inibição da oviposição e mortalidade. Além disso, espécies vegetais como *Cymbopogon citratus, Ocimum basilicum, Eucalyptus globulus* e *Lippia sidoides* têm apresentado resultados promissores no manejo de pragas agrícolas de importância econômica. Apesar das limitações relacionadas à volatilidade, estabilidade química e padronização da composição dos óleos, avanços tecnológicos, como nanoformulações e microencapsulação, vêm ampliando sua eficiência e viabilidade de aplicação no campo. Assim, os óleos essenciais apresentam elevado potencial como ferramentas sustentáveis no Manejo Integrado de Pragas (MIP) contribuindo para a redução da dependência de inseticidas sintéticos e para o desenvolvimento de sistemas agrícolas mais sustentáveis.

Palavras-chave: Controle Alternativo De Pragas. Defensivos Naturais. Manejo Integrado De Pragas. Bioatividade Vegetal. Sustentabilidade Agrícola.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do diclorodifeniltricloroetano (DDT) durante a Segunda Guerra Mundial marcou o início de uma nova fase na utilização de inseticidas sintéticos. Inicialmente, esse composto foi empregado no combate a vetores de doenças, como malária e tifo, entre soldados, sendo posteriormente incorporado de forma ampla à agricultura no período pós-guerra, em razão de sua elevada eficiência e baixo custo de produção (Li, 2022). Entretanto, o uso intensivo desses produtos, aliado à insuficiência de regulamentações ambientais e toxicológicas, resultou em sérios impactos sobre a saúde humana, animal e o meio ambiente. Estudos recentes demonstram que esses compostos podem persistir por longos períodos no ambiente, contaminando solo, água e organismos vivos, além de estarem associados a distúrbios neurológicos, endócrinos e reprodutivos (Kim; Kabir; Jahan, 2017; Sharma *et al.*, 2019).

A resistência de insetos-praga aos inseticidas sintéticos, associada aos impactos ambientais provocados pelo uso contínuo desses produtos, tem impulsionado o desenvolvimento de métodos alternativos de controle no contexto da agricultura sustentável. Entre as estratégias promissoras, destacam-se os óleos essenciais, metabólitos secundários voláteis produzidos por plantas

aromáticas, que apresentam ação inseticida sobre diferentes ordens de insetos agrícolas. Compostos como alcalóides, cumarinas e taninos hidrossolúveis atuam diretamente no sistema nervoso dos insetos, interferindo em processos fisiológicos e comportamentais, incluindo alimentação, oviposição, desenvolvimento larval e emergência de adultos. Além disso, muitos óleos essenciais apresentam efeito fumigante e repelente, características relevantes para o controle de pragas em grãos armazenados e culturas de interesse econômico (Isman, 2020; López *et al.*, 2021).

Nos últimos anos, pesquisas têm demonstrado elevada eficiência de óleos essenciais extraídos de espécies como *Cymbopogon citratus*, *Ocimum basilicum*, *Eucalyptus globulus* e *Lippia sidoides* no controle de insetos-praga como *Sitophilus zeamais*, *Spodoptera frugiperda* e *Plutella xylostella*. Além da toxicidade direta, esses compostos apresentam menor persistência ambiental e menor risco de contaminação quando comparados aos inseticidas convencionais (Pavela; Benelli, 2016; Huang *et al.,* 2021).

Diante de buscas crescentes de alternativas sustentáveis para o manejo fitossanitário, este trabalho tem como objetivo abordar, por meio de uma revisão de literatura, o potencial dos óleos essenciais no controle sustentável de insetos-praga, destacando seus mecanismos de ação, eficiência biológica e aplicação como alternativa aos inseticidas sintéticos convencionais.

2 METODOLOGIA

A pesquisa bibliográfica foi realizada com base em artigos, livros, capítulos de livros, dissertações e teses publicadas, provenientes de diversas bases de dados nacionais e internacionais, como Scopus, Web of Science, Periódico CAPES, SciELO e Google Scholar. Para a busca, foram utilizados os seguintes termos: "óleos essenciais", "manejo sustentável", "pragas agrícolas" e "controle alternativo". Os termos foram combinados com o operador booleano "and" e aplicados tanto em português quanto em inglês, com o objetivo de ampliar os resultados. Foram excluídos estudos que não apresentaram relevância direta ou que repetiam informações já estabelecidas sobre o uso de óleos essenciais como alternativas ao controle convencional.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Introdução ao Controle Sustentável de Pragas

Antes do advento dos inseticidas sintéticos, substâncias como nicotina, piretro e compostos inorgânicos eram amplamente utilizadas no controle de pragas, tanto em ambientes domésticos quanto agrícolas. Para os vetores de doenças de relevância para a saúde pública, os métodos de controle eram, em grande parte, não químicos, até a introdução do DDT e de outros inseticidas sintéticos. A chegada do DDT marcou o início de um controle em larga escala de diversas espécies

de artrópodes. Contudo, o uso contínuo desses produtos trouxe uma série de problemas, como sua persistência no ambiente, alta toxicidade, uso inadequado e a resistência crescente dos artrópodes aos pesticidas. Esses fatores levaram à proibição ou ineficácia de vários desses compostos químicos. Além disso, a proibição de diversos ingredientes ativos, devido aos seus efeitos tóxicos em seres humanos, animais e no meio ambiente, agravou ainda mais a situação (Norris; Bartholomay; Coats, 2018).

A contaminação humana por agrotóxicos ocorre principalmente por três vias: ocupacional, ambiental e alimentar (Souza Lima; Pignati; Pignatti, 2020; Ismael; Rocha, 2019). No caso da via ambiental, os resíduos se dispersam e se distribuem pelos diversos compartimentos do meio ambiente. Esses poluentes podem se propagar por correntes aéreas durante pulverizações ou infiltrar-se no solo, chegando aos lençóis freáticos e contaminando a água, a chuva e até os animais (Vasconcellos; Rizzotto; Machineski; Costa, 2019).

A busca por alternativas mais sustentáveis e menos prejudiciais à saúde e ao meio ambiente tem levado à substituição de pesticidas sintéticos por biopesticidas e outras soluções orgânicas. Adicionalmente, o manejo integrado de pragas (MIP) tem sido promovido como uma abordagem eficaz que combina métodos químicos, culturais, biológicos e mecânicos para minimizar o uso de pesticidas sintéticos e reduzir os impactos negativos associados ao seu uso indiscriminado (Hossain; Rahman; Khan, 2017).

Os inseticidas naturais, como extratos botânicos, pós vegetais e óleos essenciais, têm se consolidado como alternativas eficazes no controle de pragas. Esses produtos podem ser aplicados tanto no Manejo Integrado de Pragas (MIP) em cultivos comerciais quanto em sistemas de produção biológica e agroecológica, atuando como estratégias complementares ou substitutivas ao uso de inseticidas sintéticos. Nesse contexto, os óleos essenciais representam uma abordagem particularmente vantajosa, pois apresentam propriedades inseticidas, repelentes e fumigantes, além de contribuírem para a redução de custos, a proteção do meio ambiente e a minimização da contaminação química dos alimentos, constituindo uma alternativa compatível com os princípios da agricultura sustentável (Kéita *et al.*, 2001; Roel, 2001; Isman, 2020; Ayllón-Gutiérrez *et al.*, 2024).

3.2 Características Gerais dos Óleos Essenciais

Os óleos essenciais são extratos vegetais extremamente concentrados obtidos das folhas, flores, raízes, cascas e frutos, essas substâncias são classificadas metabólitos secundários das plantas, ou seja, não estão diretamente ligadas à sua sobrevivência, mas desempenham funções ecológicas importantes, como defesa contra predadores, atração de polinizadores e proteção contra microrganismos (Maldaner *et al.*, 2025). Possuem propriedades terapêuticas e aromáticas, sua

composição química varia dependendo da espécie vegetal (Grazioli; Grando, 2025). Podem ser obtidos através da destilação por arraste com vapor d'água ou da compressão de pericarpos de frutas cítricas (Dangelis; Negrelle; Pereira, 2025).

Nos últimos anos, os óleos essenciais ganharam popularidade em diversos setores, como tratamentos farmacológicos, alimentos, maquiagens e no controle de insetos pragas, devido aos inúmeros componentes químicos, diversas aplicações foram estudadas e testadas, incluindo suas propriedades antimicrobianas, anti-inflamatórias, antioxidantes e bioinseticidas (Bizzo; Rezende, 2022; Santos *et al.*, 2025; Gomez *et al.*, 2025).

Os métodos mais utilizados e que apresentam melhores resultados são a destilação pela água e pela vaporização. A destilação tem por finalidade separar a parte volátil do óleo essencial da massa restante não volátil (Valentim; Soares, 2018). A metodologia é simples e consiste da utilização de um destilador, ocorre a elevação da temperatura até atingir a ebulição, o vapor resultante é conduzido para um condensador onde há um resfriamento e convertido na sua forma líquida, contendo água e pequena quantidade de óleo. No fim formam-se duas camadas bem distintas, perfeitamente separadas, devido à densidade da água e do óleo (Serrano; Figueiredo, 2018; Bruno; Almeida, 2021).

Quanto à composição química, qualitativa e quantitativa, varia de espécie, a parte da planta que foi extraído, se a planta se encontra com flores ou frutos e condições ambientais. São classificados em monoterpenos, sesquiterpenos, álcoois, aldeídos, ésteres, fenóis, éteres e óxidos, peróxidos, furanos, lactonas e ácidos (Soares; de Veras; de Andrade, 2023). Plantas como: cravo-da-índia, canela, capim-limão, eucalipto e hortelã apresentam maior rendimento de óleo, variando de 1% a 5% do seu peso fresco, está atribuído a espécies ricas em compostos fenólicos. Ao contrário da erva-mate, cidreira-do-mato e flores como jasmim, violeta e gardênia possuem quantidades menores que 1% (Simas *et al.*, 2017; Ribeiro; Bonilla; Lucena, 2018; Marques *et al.*, 2024).

No contexto agrícola, por exemplo, os óleos essenciais têm sido estudados como bioinseticidas naturais no controle de pragas, por apresentarem baixa toxicidade para humanos e menor impacto ambiental, alinhando-se com os princípios da sustentabilidade e da agricultura orgânica (Avelino *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2025). Os óleos essenciais apresentam múltiplos mecanismos de ação sobre os insetos, afetando o sistema nervoso e/ou processos fisiológicos e comportamentais, o modo de ação resulta em efeitos letais e subletais que comprometem a sobrevivência e a reprodução (Da Silva *et al.*, 2024; Da Silva Junior *et al.*, 2025).

Um dos principais mecanismos de ação ocorre sobre o sistema nervoso central. Muitos compostos presentes nos óleos essenciais, como terpenos, aldeídos, ésteres, fenóis e composto que

variam por espécie vegetal, são capazes de inibir a enzima acetilcolinesterase, responsável pela degradação do neurotransmissor acetilcolina nas sinapses, resultando em uma superestimulação das células nervosas, levando à hiperatividade, tremores, paralisia e a morte do inseto (Mattos *et al.*, 2021; Goulart *et al.*, 2025).

Outro importante mecanismo de ação está relacionado ao efeito fumigante, resultante da alta volatilidade dos óleos essenciais. Quando em fase gasosa, as moléculas penetram pelo sistema traqueal dos insetos e alcançam os tecidos internos, onde interferem no metabolismo respiratório. Compostos como o 1,8-cineol e o eugenol podem inibir enzimas da cadeia transportadora de elétrons mitocondrial, reduzindo a produção de ATP e causando asfixia metabólica (Alves *et al.*, 2023).

Os óleos também agem sobre a membrana celular, interagindo com os lipídeos da membrana, provocando aumento da permeabilidade e perda da integridade estrutural, resultando em colapso osmótico e morte celular. Além disso, esses compostos podem inibir enzimas digestivas e oxidativas, interferindo em processos metabólicos vitais (Da Cruz *et al.*, 2024).

Outros efeitos fisiológicos incluem a interferência dos níveis hormonais, especialmente nos hormônios juvenis e ecdisonas, que regulam o crescimento e a muda dos insetos. Essas alterações podem causar deformidades, atraso no desenvolvimento ou inibição completa da metamorfose. Podem interferir na comunicação química entre os indivíduos, prejudicando o reconhecimento de feromônios e a orientação espacial (Silva *et al.*, 2017; Assunção *et al.*, 2023).

3.3 Aplicações no Controle de Pragas Agrícolas

A maior parte da aplicação dos óleos ocorre primeiramente em laboratório com testes de contato, fumigação, repelência, entre outros, são testados em diversos insetos-praga. A próxima etapa é o isolamento do principal composto ativo desse óleo, assim, a sintetização de um composto facilitaria o uso entre pequenos e grandes produtores.

Da Silva *et al.* (2024) testou 5 óleos essenciais por meio de teste de contato oferecendo pedaços de abóbora, erva-doce (*Foeniculum vulgare*), hortelã-pimenta (*Mentha piperita*), cravo (*Syzygium aromaticum*), citronella (*Cymbopogon nardus*) e capim-limão (*Cymbopogon citratus*) na concentração de 30 µL sobre ninfas de *Planococcus citri*. A maioria dos óleos essenciais, na concentração testada, mostrou eficácia na mortalidade das ninfas. Alves *et al.* (2023) avaliou os efeitos fumigantes dos óleos de *Rosmarinus officinalis, Citrus sinensis, Citrus paradisi, Eugenia caryophyllus* sobre o coleóptero *Sitophilus zeamais* em milho armazenado e estimou suas concentrações letais (CL50 e CL90). Os óleos essenciais de *R. officinalis e C. sinensis* apresentaram toxicidade pela via de fumigação sobre *S. zeamais* em concentrações altas.

Alves *et al.* (2024) avaliou a eficiência inseticida dos óleos essenciais de *Vanillosmopsis arborea* e *Lippia microphylla* sobre *Spodoptera frugiperda* e verificou a seletividade ao predador *Euborellia annulipes*. As diluições dos óleos foram realizadas em Tween® 80 nas concentrações de 0, 100, 150 e 200 mg mL^{-1}. Os óleos essenciais de *V. arborea* e *L. microphylla* foram eficientes no controle de *S. frugiperda*, mas não são seletivos ao predador *E. Annulipes*. Silva *et al.* (2024) avaliou a toxicidade do óleo de cravo-da-Índia (*Syzygium aromaticum*) para o manejo de *Mononychellus tanajoa*, os discos de folhas foram pulverizados com quatro diferentes concentrações: 1,5; 2,5; 5,5; 6,5 µL. As concentrações de 2,5; 5,5 e 6,5 µL apresentaram mortalidade de 84, 96 e 100%, respectivamente.

3.4 Vantagens e Limitações no Uso Agrícola

O destaque dos óleos se dá por seu potencial como alternativa ao uso dos sintéticos, por serem considerados menos agressivos ao ambiente. Por serem extraídos de diversas plantas, a ação dos compostos apresenta em diversos casos atividades fungicidas, repelentes e inseticidas. Seu uso se encaixa na busca por sistemas agrícolas mais sustentáveis, especialmente diante das preocupações relacionadas à contaminação ambiental, resistência de pragas e resíduos tóxicos em alimentos (Bertini *et al.,* 2005; Zimmermann *et al.*, 2020).

Muitos óleos essenciais possuem baixa toxicidade para organismos não-alvo, com polinizadores e inimigos naturais, favorecendo o equilíbrio ecológico nos agros ecossistemas. Outro benefício é a diversidade de compostos bioativos presentes nesses óleos, o que dificulta o desenvolvimento de resistência por parte das pragas (Tworkoski, 2002; Thormar, 2012).

Apesar das vantagens, a utilização dos óleos essenciais na agricultura ainda enfrenta limitações importantes. Um dos principais desafios está relacionado à alta volatilidade desses compostos, que podem evaporar rapidamente após a aplicação, reduzindo sua persistência e eficácia em campo (Simões; Spitzer, 2004; Thormar, 2012). Fatores ambientais como temperatura, luz e oxidação podem comprometer sua estabilidade química, dificultando a manutenção da atividade biológica ao longo do tempo. Outro problema recorrente é a falta de padronização na composição química dos óleos essenciais, uma vez que fatores como, solo, época de coleta, clima e método de extração influenciam diretamente na concentração dos metabólitos presentes. De modo, que o mesmo óleo essencial pode apresentar diferentes níveis de eficiência dependendo da origem vegetal e das condições de produção (Bakkali *et al.,* 2008; Morais, 2009).

Os avanços tecnológicos vêm desempenhando papel fundamental para ampliar a viabilidade agrícola dos óleos essenciais. Técnicas como nanoformulações e microencapsulação têm sido desenvolvidas com o objetivo de proteger os compostos ativos contra degradação, controlar sua liberação e aumentar sua estabilidade (Yammine *et al.*, 2024). As nanoformulações

permitem que os princípios ativos sejam transportados em partículas extremamente pequenas, favorecendo maior aderência, penetração e eficiência biológica. Já a microencapsulação reduz perdas por volatilização e promove liberação gradual dos compostos no ambiente, aumentando sua persistência em condições de campo (Ayllón-Gutiérrez *et al.*, 2024).

As perspectivas futuras indicam um grande potencial de integração dos óleos essenciais ao manejo integrado de pragas (MIP) e à agricultura sustentável. Seu uso pode ser associado a métodos biológicos, culturais e físicos de controle, reduzindo a dependência de pesticidas sintéticos e contribuindo para sistemas produtivos mais equilibrados e ambientalmente responsáveis (Isman, 2020). A crescente demanda por alimentos com menor carga química fortalece o interesse científico e comercial por produtos de origem botânica e por tecnologias sustentáveis aplicadas à proteção de cultivos (Ayllón-Gutiérrez et al., 2024).

4 CONCLUSÃO

O uso intensivo de inseticidas sintéticos causou sérios impactos ambientais, como a degradação da biodiversidade, contaminação dos recursos hídricos e do solo, além de efeitos adversos à saúde humana e animal. A resistência crescente das pragas e a persistência desses compostos no ambiente tornam urgente a busca por alternativas mais sustentáveis. Nesse contexto, os óleos essenciais têm despertado grande interesse devido ao seu potencial inseticida e à menor agressividade ambiental quando comparados aos pesticidas sintéticos convencionais. A adoção de práticas como o uso de óleos essenciais, pode ser uma solução eficaz para mitigar os danos causados pelos produtos sintéticos, promovendo uma agricultura mais sustentável e equilibrada.

REFERÊNCIAS

ALVES, A. C. L. *et al.* Atividade inseticida de óleos essenciais sobre *Spodoptera frugiperda* e seletividade para *Euborellia annulipes*. **Brazilian Journal of Biology**, v. 84, p. e260522, 2024.

ALVES, M. J. P. *et al.* Óleos essenciais como fumigantes para o manejo do gorgulho-do-milho (*Sitophilus zeamais*). *In:* **Open Science Research XI**. Editora Científica Digital, p. 1294-1305, 2023.

ARRUDA, F. P.; BATISTA, J. L. Efeito da luz, de óleos vegetais e de cultivares de caupi na infestação do caruncho *Callosobruchus maculatus* (Fabr., 1775) (Coleoptera: Bruchidae). **Revista Caatinga**, v. 11, n. 1/2, p. 53-57, 1998.

ASSUNÇÃO, S. J. R. *et al.* Soil quality index of an ultisol under long-term plots in the coastal tablelands in northeastern Brazil. **Revista Caatinga**, v. 36, n. 2, p. 432–444, 2023.

AVELINO, L. D. *et al.* Repelência de óleos essenciais e vegetais sobre pulgão-preto *Aphis craccivora* Koch na cultura do feijão-fava (*Phaseolus lunatus* L.). **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 14, n. 1, p. 21–26, 2019.

AYLLÓN-GUTIÉRREZ, R. *et al.* Applications of plant essential oils in pest control and their encapsulation for controlled release: a review. **Agriculture**, v. 14, n. 10, p. 1766, 2024.

BAKKALI, F. *et al.* Biological effects of essential oils – A review. **Food and Chemical Toxicology**, v. 46, n. 2, p. 446–475, 2008. DOI: 10.1016/j.fct.2007.09.106.

BERTINI, L. M. *et al.* Perfil de sensibilidade de bactérias frente a óleos essenciais de algumas plantas do nordeste do Brasil. **Infarma**, v. 17, n. 3/4, p. 80–83, 2005.

BIZZO, H. R.; REZENDE, C. M. O mercado de óleos essenciais no Brasil e no mundo na última década. **Química Nova**, v. 45, p. 949-958, 2022.

BRUNO, C. M. A.; ALMEIDA, M. R. Óleos essenciais e vegetais: matérias-primas para fabricação de bioprodutos nas aulas de química orgânica experimental. *Química Nova*, v. 44, n. 7, p. 899-907, 2021.

DA CRUZ, I. L. S. *et al.* Da história às práticas modernas: a função dos óleos essenciais na sustentabilidade e no controle de insetos. **Revista Mosaico**, v. 15, n. 2, p. 86-96, 2024.

DA SILVA, Y. *et al.* Toxicidade de cinco óleos essenciais sobre ninfas de *Planococcus citri*. **Revista Ciência Agrícola**, v. 22, n. especial, p. 1-5, 2024.

DA SILVA JUNIOR, M. F. *et al.* Toxicidade do óleo essencial de citronela e do composto citronelal sobre *Toxoptera citricida* (Kirkaldy, 1907) (Hemiptera: Aphididae). **Revista Ciência Agrícola**, v. 23, p. 1-9, 2025.

DANGELIS, A. S. R.; NEGRELLE, R. R. B.; PEREIRA, F. K. Óleos essenciais de espécies da biodiversidade brasileira: uma abordagem bibliométrica do conhecimento científico. **Revista Fitos**, v. 19, p. e1696, 2025.

DE SOUZA, R. M. *et al.* Occurrence, impacts and general aspects of pesticides in surface water: a review. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 135, p. 22-37, 2020.

GOMES, A. C. G. *et al.* Inovação em cosméticos antimicrobianos sustentáveis: desenvolvimento de sabonete líquido à base de óleos essenciais. **Revista H-TEC Humanidades e Tecnologia**, v. 12, n. 1, p. 93-107, 2025.

GOULART, F. L. *et al.* Óleos essenciais como bioinseticidas. **Brazilian Journal of Development**, v. 11, n. 8, p. 1–13, 2025.

GRAZIOLI, T.; GRANDO, C. P. Terapias complementares no tratamento da ansiedade: aplicação de óleos essenciais e acupuntura. **Revista Perspectiva**, v. 49, n. 183, p. 109-118, 2025.

HOSSAIN, L.; RAHMAN, R.; KHAN, M. S. Alternatives of pesticides. In: KHAN, M. S.; RAHMAN, M. S. (ed.). **Pesticide residue in foods: sources, management, and control**. Cham: Springer, 2017.

HUANG, X. et al. Isolation and insecticidal activity of essential oil from *Artemisia lavandulaefolia* against *Plutella xylostella*. **Toxins**, Basel, v. 13, n. 12, p. 842, 2021.

ISMAN, M. B. Botanical insecticides in the twenty-first century: fulfilling their promise? **Annual Review of Entomology,** v. 65, p. 233-249, 2020.

ISMAN, M. B. Botanical insecticides, deterrents, and repellents in modern agriculture and an increasingly regulated world. **Annual Review of Entomology**, v. 51, p. 45-66, 2006.

KÉITA, S. M. e*t al.* Efficacy of essential oil of *Ocimum basilicum* and *Ocimum gratissimum* applied as an insecticidal fumigant and powder to control *Callosobruchus maculatus* (Fab.) (Coleoptera: Bruchidae). **Journal of Stored Products Research**, v. 37, p. 339-349, 2001.

KIM, K. H; KABIR, E; JAHAN, S. A. Exposure to pesticides and the associated human health effects. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 575, p. 525-535, 2017. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.009.

LI, Z. Prioritizing agricultural pesticides to protect human health: a multi-level strategy combining life cycle impact and risk assessments. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Amsterdam, v. 242, p. 113869, 1 set. 2022. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2022.113869

LÓPEZ, M. D. *et al.* New insights into biopesticides: solid and liquid formulations of essential oils and derivatives. **Frontiers in Agronomy**, Lausanne, v. 3, 2021.

MALDANER, J. *et al.* Influência da sazonalidade no rendimento de óleos essenciais no Sul do Brasil. **Disciplinarum Scientia Naturais e Tecnológicas**, v. 26, n. 1, p. 33-43, 2025.

MARQUES, S. P. D. *et al.* Avaliação quantitativa de ácidos amargos, xanthohumol e óleos essenciais presentes em flores de diferentes cultivares de *Humulus lupulus* L. produzidas na região nordeste do Brasil. **Química Nova**, v. 47, n. 2, p. e20230092, 2024.

MATTOS, A. P. *et al.* **Uso de óleos essenciais no milho**. Estrabão, v. 2, p. 139–147, 2021.

MORAIS, L. A. S. Influência dos fatores abióticos na composição química dos óleos essenciais. **Horticultura Brasileira**, v. 27, n. 2, p. S4050–S4063, 2009.

PAVELA, R.; BENELLI, G. Essential oils as ecofriendly biopesticides? Challenges and constraints. **Trends in Plant Science**, v. 21, n. 12, p. 1000–1007, 2016.

RIBEIRO, S. M.; BONILLA, O. H.; LUCENA, E. M. P. **Influência da sazonalidade e do ciclo circadiano no rendimento e composição química dos óleos essenciais de *Croton spp.* da Caatinga**. Iheringia Série Botânica, v. 73, n. 1, p. 31-38, 2018.

ROEL, A. R. Utilização de plantas com propriedades inseticidas: uma contribuição para o desenvolvimento rural sustentável. **Revista Internacional de Desenvolvimento Local**, v. 1, n. 2, p. 43-50, 2001.

SANTOS, F. L. O. *et al.* Ação antimicrobiana e caracterização fitoquímica dos óleos essenciais de *Eucalyptus* e pinho. **Research, Society and Development**, v. 14, n. 2, p. e5014248225, 2025.

SANTOS, M. F. *et al.* Perfil químico e atividade acaricida *in silico* e *in vitro* do óleo essencial das folhas de *Peperomia pellucida* (L.) Kunth coletadas em Itacoatiara. **Revista Saúde e Desenvolvimento**, v. 19, n. 30, p. 30-41, 2025.

SERRANO, C.; FIGUEIREDO, A. C. Métodos de obtenção dos óleos essenciais e outros extratos. *In:* COELHO, I. S.; PESTANA, M. (ed.). **A fileira das plantas aromáticas e o desenvolvimento local**. p. 83-96, 2018.

SHARMA, A. *et al.* Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem. **SN Applied Sciences**, Cham, v. 1, n. 11, p. 1-16, 2019. DOI: 10.1007/s42452-019-1485-1.

SILVA, M. S. F. S. *et al.* A toxicidade do óleo essencial de cravo-da-índia, *Syzygium aromaticum* (L.) Merr. & Perry (Myrtaceae) sobre o ácaro-verde da mandioca, *Mononychellus tanajoa* (Bondar) (Acari: Tetranychidae). **Revista Ciência Agrícola**, v. 22, p. 1-4, 2024.

SILVA, T. I. *et al.* Efeito larvicida de óleos essenciais. **Revista Verde**, v. 12, n. 2, p. 256–260, 2017.

SIMAS, D. L. R. *et al.* Caracterização dos óleos essenciais de frutas cítricas. **Citrus Research & Technology**, v. 36, n. 1, p. 15-26, 2017.

SIMÕES, C. M. O.; SPITZER, V. Óleos voláteis. *In:* SIMÕES, C. M. O. *et al.* **Farmacognosia: da planta ao medicamento**. 5. ed. Porto Alegre: Editora UFRGS; Florianópolis: Editora UFSC, 2004. p. 468–495.

SOARES, M. L. L. R.; DE VERAS, B. O.; DE ANDRADE, F. M. Avaliação da composição química e atividade antidiabética *in vitro* dos óleos essenciais de *Algrizea minor* (Myrtaceae) e *Eugenia brejoensis* (Myrtaceae). **Evidência**, v. 23, n. 1, p. 33-46, 2023.

SOUZA E LIMA, F. A. N.; PIGNATI, W. A.; PIGNATTI, M. G. **A extensão do 'agro' e do tóxico: saúde e ambiente na terra indígena Marãiwatsédé***,* Mato Grosso. Cadernos Saúde Coletiva, v. 28, n. 1, p. 1-11, 2020.

THORMAR, H. **Lipids and essential oils as antimicrobial agents**. London: John Wiley & Sons, 2012.

TWORKOSKI, T. Herbicide effects of essential oils. **Weed Science**, v. 50, n. 4, p. 425–431, 2002.

VALENTIM, J. A.; SOARES, E. C. Extração de óleos essenciais por arraste a vapor: um kit experimental para o ensino de química. **Química Nova na Escola**, v. 40, n. 4, p. 297-301, 2018.

VASCONCELLOS, P. R. O. *et al.* Condições da exposição a agrotóxicos de portadores da Parkinson's disease acompanhados no ambulatório de neurologia de um hospital universitário e a percepção da relação da exposição com o adoecimento. **Saúde em Debate**, v. 43, n. 123, p. 1084-1094, 2019.

YAMMINE, J. *et al.* **Advances in essential oils encapsulation: development, characterization and release mechanisms**. Polymer Bulletin, 2024.

ZIMMERMANN, R. C. *et al.* Insecticide activity and toxicity of essential oils against two stored-product insects. **Crop Protection**, v. 144, p. 105575, 2021.

CAPÍTULO 13

COMPETIÇÃO INTERESPECÍFICA ENTRE FORRAGEIRAS TROPICAIS E GRAMÍNEAS INVASORAS (*Sporobolus indicus* e *Paspalum virgatum*) COMO ESTRATÉGIA DE MANEJO

João Paulo Bernardi Ferreira
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos /Universidade de São Paulo, Brasil

Lucas Barbosa
Centro de Ciências Agrárias/ Universidade Federal de São Carlos, Brasil

Luiz Guilherme Pessoa Lourenço Bomfiglio
Centro de Ciências Agrárias/ Universidade Federal de São Carlos, Brasil

Ronilson Martins Silva
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/ Universidade de São Paulo, Brasil

Inara Araújo Mota
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/ Universidade de São Paulo, Brasil

Fernanda de Fátima da Silva Devechio
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/ Universidade de São Paulo, Brasil

Patrícia Andrea Monquero
Centro de Ciências Agrárias/ Universidade Federal de São Carlos, Brasil

DOI: 10.52832/wed.221.1310

Resumo: A infestação por plantas daninhas como *Sporobolus indicus* e *Paspalum virgatum* continua sendo um gargalo crítico para a persistência de pastagens em regiões tropicais. Diante das crescentes preocupações com a dependência de herbicidas e a eficácia limitada do controle químico para gramíneas perenes (Spader e Matera 2010), o controle cultural por meio da competição interespecífica surge como uma alternativa sustentável. Este estudo avaliou a capacidade competitiva de três gramíneas forrageiras, *Panicum maximum* × *Panicum infestum* cv. Massai, *Urochloa brizantha* cv. Marandu e *Andropogon gayanus*, na supressão do crescimento dessas espécies invasoras. O experimento seguiu um delineamento inteiramente casualizado em casa de vegetação, simulando diferentes níveis de interferência de plantas daninhas. As características biológicas do capim-marandu (Camarão e Filho 2005) e a robustez do *A. gayanus* foram comparadas quanto à capacidade de reduzir a biomassa das plantas daninhas. Os resultados demonstraram que todas as forrageiras exerceram uma pressão competitiva significativa, com o *Andropogon gayanus* exibindo a maior eficiência na redução da massa seca da parte aérea de ambas as plantas daninhas. Esses achados alinham-se com a necessidade de práticas de manejo integrado para recuperar pastagens degradadas (Borghi *et al.* 2018). Conclui-se que a seleção estratégica de cultivares competitivos é uma ferramenta viável para a supressão de plantas daninhas, contribuindo para a intensificação ecológica dos sistemas de produção pecuária.

Palavras-chave: *Andropogon gayanus*. Competição interespecífica. Controle cultural. Supressão de plantas daninhas.

1 INTRODUÇÃO

A pecuária de corte e de leite no Brasil desempenha um papel fundamental na economia nacional, contribuindo significativamente para o Produto Interno Bruto (PIB) e posicionando o país como um dos maiores exportadores mundiais de proteína animal (IBGE, 2023). A base desse sistema de produção apoia-se quase exclusivamente no uso de pastagens, que representam a forma mais econômica e prática de alimentação do gado. No entanto, a sustentabilidade dessa atividade é ameaçada pela degradação das pastagens, que afeta grande parte das áreas produtivas do Brasil. Estima-se que mais da metade das pastagens cultivadas no país apresente algum grau de degradação, resultando em perdas na produtividade tanto biológica quanto econômica.

Um dos principais indicadores e, ao mesmo tempo, agentes agravantes da degradação é a infestação por plantas daninhas. Espécies como *Sporobolus indicus* (capim-mourão) e *Paspalum virgatum* (capim-navalha) destacam-se devido à sua agressividade e dificuldade de manejo em ambientes de pastagens tropicais. Essas gramíneas invasoras possuem alta capacidade de dispersão, sistemas radiculares robustos e rápido crescimento inicial, o que lhes confere vantagem competitiva sobre as espécies forrageiras sob condições de manejo inadequado ou estresse ambiental (Brasil, 2012). A presença dessas espécies não apenas reduz a disponibilidade de forragem para os animais, mas também diminui o valor nutricional da dieta e pode causar lesões físicas ao gado, no caso das bordas cortantes do capim-navalha.

Historicamente, o controle químico tem sido a ferramenta predominante para o manejo dessas espécies invasoras. Contudo, a eficácia dos herbicidas é frequentemente limitada pela proximidade botânica entre a planta daninha (gramínea) e a planta cultivada (forrageira), o que restringe a seletividade dos produtos disponíveis. Além disso, o uso intensivo de defensivos agrícolas desperta preocupações crescentes quanto aos impactos ambientais, como a contaminação de mananciais de água e a persistência de resíduos no solo (Spadotto *et al.*, 2004), bem como o aumento dos custos de produção e o risco de desenvolvimento de biótipos resistentes.

Nesse contexto, surge a necessidade de estratégias de manejo integrado que priorizem o controle cultural. O controle cultural baseia-se no uso do vigor vegetativo das espécies forrageiras como barreira biológica ao estabelecimento e crescimento de plantas daninhas. A teoria da competição interespecífica postula que, ao selecionar cultivares com alta capacidade de ocupação de nicho, rápido fechamento do dossel e sistemas radiculares agressivos, é possível suprimir as espécies invasoras por meio da competição por luz, nutrientes e água.

As espécies forrageiras tropicais apresentam variação significativa nas características morfogênicas e estruturais que influenciam sua capacidade competitiva. A *Urochloa brizantha* cv. Marandu é amplamente utilizada no Brasil devido à sua plasticidade fenotípica e resistência a pragas (Camarão & Filho, 2005). Por outro lado, o *Panicum maximum* × *Panicum infestum* cv. Massai destaca-se por sua alta densidade de perfilhos e rápida rebrota, características que podem favorecer a cobertura do solo e evitar a emergência de plantas daninhas. Adicionalmente, o *Andropogon gayanus* é conhecido por sua rusticidade e capacidade de adaptação a solos de baixa fertilidade e períodos de seca prolongados, exibindo crescimento vigoroso em touceiras que pode exercer forte pressão sobre os competidores.

Compreender a dinâmica competitiva entre esses cultivares e as espécies invasoras *S. indicus* e *P. virgatum* é essencial para desenhar sistemas de pastejo mais resilientes. Embora a literatura relate o potencial de supressão de diversas gramíneas, dados específicos sobre a interferência mútua em diferentes densidades populacionais de plantas daninhas ainda requerem maiores investigações, especialmente em condições que simulam a sucessão biológica em pastagens degradadas. A avaliação da biomassa aérea e dos componentes de crescimento sob condições controladas fornece um suporte teórico valioso para prever o comportamento em campo e validar técnicas de recuperação de pastagens por meio do manejo da biomassa (Borghi *et al.*, 2018).

Diante do exposto, o presente estudo justifica-se pela busca por alternativas sustentáveis e de baixo custo para o manejo de plantas daninhas de difícil controle. O objetivo foi avaliar a capacidade competitiva e o potencial de supressão das forrageiras Massai, Marandu e Andropogon sobre o desenvolvimento do capim-mourão e do capim-navalha, visando identificar as espécies e

as condições de densidade que melhor promovem o equilíbrio produtivo em ecossistemas de pastagens tropicais.

2 METODOLOGIA

O experimento foi conduzido sob condições de casa de vegetação no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Campus de Araras, São Paulo. Embora o ensaio tenha ocorrido em ambiente protegido, as variáveis micrometeorológicas de temperatura e luminosidade não foram controladas artificialmente, acompanhando as variações climáticas naturais da região (Cwa, segundo Köppen) durante o período experimental. Essa condição permitiu uma aproximação maior com a realidade de campo, onde as flutuações térmicas e o fotoperíodo local influenciam diretamente o desenvolvimento das plantas forrageiras e invasoras.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), arranjado em esquema fatorial 2x6. Foram avaliadas duas espécies de plantas daninhas: *Sporobolus indicus* (capim-mourão) e *Paspalum virgatum* (capim-navalha), sob seis densidades de infestação (0, 2, 4, 6, 10 e 12 plantas por metro quadrado) (Ruas *et al.*, 2025). O estudo foi replicado para três gramíneas forrageiras competidoras: *Panicum maximum* x *Panicum infestum* cv. Massai, *Urochloa brizantha* cv. Marandu e *Andropogon gayanus*.

Para o preenchimento dos vasos de 30 litros, coletou-se solo com textura conhecida da camada superficial (0-20 cm) de áreas de Latossolo Vermelho, de acordo com a análise de solo (Tabela 1). A análise química foi realizada para caracterizar o substrato; no entanto, o solo não recebeu nenhuma correção de acidez (calagem) ou fertilização mineral. O objetivo dessa omissão foi simular o estado nutricional degradado, típico de áreas de pastagens extensivas brasileiras, onde a competição por nutrientes se torna um fator determinante na dominância de espécies invasoras sobre as cultivadas (Carvalho *et al.*, 2020).

Tabela 1 – Propriedades químicas e concentrações de nutrientes da amostra de solo coletada na profundidade de 0–20 cm.

pH	Resin P	Mehlich-1 P		P-rem	S	Resin K	K	Ca	Mg	Al	H + Al	SOM	CEC
H_2O			$CaCl_2$			mg . dm^{-3} (ppm)		mmol . dm^{-3}			g/Kg		
n.d	5.1	12	n.d	n.d	17	1.5	n.d	29	11	0.00	31	26	15

Fonte: Autores, 2026.

Aqui está a tradução do trecho para o português, mantendo a precisão técnica dos termos de irrigação, secagem de biomassa e estatística:

O manejo da água foi a única variável ambiental estritamente monitorada e controlada ao longo de todo o experimento. Uma lâmina de irrigação diária de 5 mm foi aplicada em todos os vasos, garantindo um suprimento hídrico constante e evitando que a água se tornasse um fator de diferenciação entre os tratamentos. Isso garantiu que os resultados de biomassa fossem decorrentes exclusivamente da interferência competitiva, e não de um estresse hídrico diferencial (Foxx *et al.*, 2019).

A coleta de dados ocorreu no estádio de florescimento das plantas invasoras. A biomassa aérea de todas as plantas foi colhida e submetida à secagem em estufa de circulação forçada de ar (65°C por 72 horas) para a determinação da massa seca (Silva, 2009).

Os dados foram analisados por meio da análise de variância (ANOVA) com o teste F. As médias qualitativas foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$). Para o fator quantitativo relacionado às densidades de plantas daninhas, foram ajustados modelos de regressão linear e não-linear, permitindo a interpretação da dinâmica de perda de biomassa das forrageiras em função do aumento da pressão de infestação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da biomassa seca da parte aérea (MSPA) tanto das espécies forrageiras quanto das plantas daninhas revelou uma dinâmica competitiva complexa, influenciada pela agressividade das espécies invasoras e pela plasticidade das gramíneas cultivadas sob condições de solo degradado.

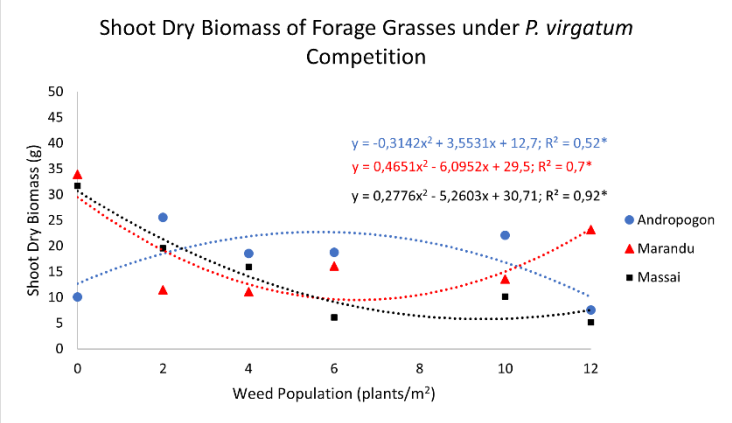
3.1 Análise de Regressão

Os resultados obtidos demonstraram que a interferência das plantas daninhas exerceu um impacto negativo e significativo no acúmulo de Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) em todas as gramíneas forrageiras avaliadas. Longe de ser uma coexistência neutra, a análise estatística confirmou que todos os modelos de regressão foram significativos ($p < 0,05$), evidenciando uma correlação inversa entre o aumento da densidade populacional das plantas daninhas (de 0 para 12 plantas/m^2) e a produtividade das forrageiras.

Para o cultivar Massai (*Panicum maximum*), observou-se o maior ajuste estatístico entre as espécies testadas. Na competição com a *Paspalum virgatum* (capim-navalha), o modelo quadrático apresentou um alto coeficiente de determinação (R^2), indicando que grande parte da variação na biomassa da forrageira foi explicada pelo aumento da pressão de infestação da planta daninha (Figura 1). Esse elevado grau de previsibilidade reforça a sensibilidade do capim-massai à

competição direta por recursos em solos de baixa fertilidade, onde cada unidade adicional de planta daninha resulta em uma redução mensurável e severa na MSPA da forrageira (Oliveira *et al.*, 2020).

Figura 1 – Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) das gramíneas forrageiras Massai (*Panicum maximum* x *Panicum infestum*), Marandu (*Urochloa brizantha*) e Andropogon (*Andropogon gayanus*) em função do aumento da densidade populacional de *Paspalum virgatum* (capim-navalha).

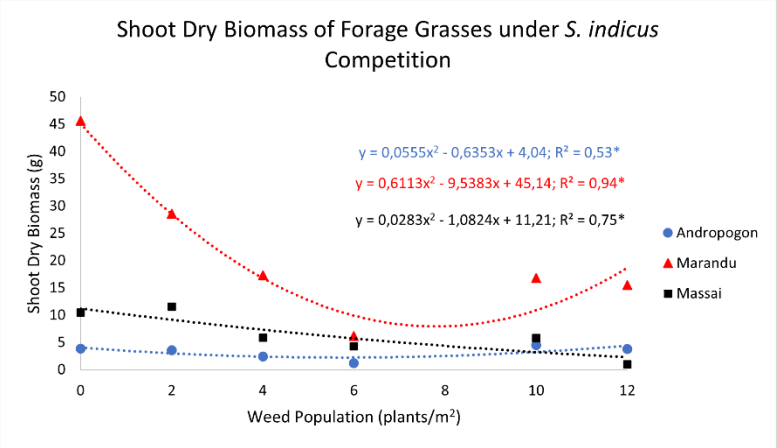


As linhas representam os modelos de regressão ajustados, acompanhados de suas respectivas equações, coeficientes de determinação (R^2) e indicação de significância estatística (*: $p < 0,05$).

Fonte: Autores, 2026.

O cultivar Marandu (*Urochloa brizantha*) também exibiu modelos de regressão altamente ajustados, especialmente com um alto valor de R^2 na presença de *Sporobolus indicus* (capim-mourão) (Figura 2). Embora tenha apresentado a maior média de biomassa absoluta na ausência de competição (45,63 g), o capim-marandu sofreu declínios drásticos de produção logo nas primeiras densidades de infestação (2 plantas/m²) (Marchi *et al.*, 2017). Esse comportamento sugere que, sob condições de solo sem correção e sem fertilização, a capacidade competitiva inicial dessa gramínea é comprometida, permitindo que a espécie invasora se estabeleça e cause perdas de produtividade superiores a 50% mesmo em níveis iniciais de interferência.

Figura 2 – Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) das gramíneas forrageiras Massai (*Panicum maximum* x *Panicum infestum*), Marandu (*Urochloa brizantha*) e Andropogon (*Andropogon gayanus*) sob diferentes níveis de interferência de *Sporobolus indicus* (capim-capeta).



Os modelos de regressão ilustram a redução na produtividade das forrageiras à medida que a população de plantas daninhas aumenta, incluindo o coeficiente de determinação (R^2) e a significância estatística (*: $p < 0,05$).
Fonte: Autores, 2026.

O *Andropogon gayanus*, embora tenha apresentado curvas de regressão com inclinações menos acentuadas em comparação ao Marandu, também teve seu crescimento reduzido significativamente pelo aumento das densidades de ambas as espécies invasoras, com altos coeficientes de determinação (R^2) para *P. virgatum* e *S. indicus*. A redução na MSPA do Andropogon confirma que, embora essa espécie seja reconhecida por sua rusticidade em solos pobres, a pressão competitiva exercida pelas plantas invasoras em ambientes de pastagens degradadas é suficiente para limitar seu desenvolvimento vegetativo (Mitja; Obert, 2004).

Uma tendência interessante foi observada para o *Andropogon gayanus*, em que a massa seca da parte aérea aumentou em densidades baixas a moderadas de plantas daninhas (variando de 21,8 a 25,6 g) em comparação com a testemunha livre de plantas daninhas (10,1 g), antes de declinar acentuadamente na maior densidade de 12 plantas/m² (7,57 g). Esse aumento inicial na biomassa sob baixos níveis de competição podem ser atribuído a um mecanismo de crescimento compensatório ou resposta de supercompensação. Em forrageiras tropicais rústicas, a presença inicial de plantas daninhas vizinhas pode estimular o perfilhamento precoce e mudanças na alocação de recursos como uma resposta plástica à competição por luz ou espaço. Além disso, essa flutuação deve ser interpretada juntamente com o alto coeficiente de variação (CV = 45,76%) observado para essa espécie, o que reflete uma pronunciada variabilidade fenotípica e potencial heterogeneidade individual durante o estabelecimento das plantas sob condições de casa de vegetação.

A análise conjunta dos dados revelou que a *Paspalum virgatum* atua como uma competidora mais agressiva do que a *Sporobolus indicus*, causando reduções mais rápidas na biomassa das

forrageiras. A ausência de correção e fertilização do solo foi um fator determinante para esses resultados, uma vez que plantas daninhas adaptadas a ambientes de baixo uso de insumos são capazes de capturar nutrientes escassos com maior eficiência inicial do que os cultivares forrageiros. Em resumo, os modelos de regressão validam que o manejo de pastagens degradadas requer um controle populacional rigoroso das espécies invasoras, visto que mesmo baixas densidades de infestação comprometem severamente a capacidade produtiva da pastagem (Dias-Filho, 2014).

3.2 Dinâmica das Plantas Daninhas

As curvas de regressão para a *Sporobolus indicus* (capim-mourão) indicaram um padrão de redução linear à medida que a densidade aumentou, sugerindo que, embora a espécie consiga se estabelecer, o acúmulo de biomassa de seus indivíduos é limitado pela presença das forrageiras vizinhas. A *S. indicus* comportou-se como uma competidora do tipo persistente, mantendo populações estáveis sem exercer dominância absoluta sobre o dossel (Ferrell *et al.*, 2006).

Em contraste, a *Paspalum virgatum* (capim-navalha) apresentou curvas de interferência mais acentuadas. Em baixas densidades, a espécie invasora exibiu crescimento vigoroso, com a regressão indicando que cada indivíduo adicional exercia forte pressão sobre a forrageira. Sendo uma gramínea C4 de crescimento rápido, a *P. virgatum* demonstrou maior capacidade de interceptação de luz, o que explica as inclinações negativas mais acentuadas observadas nas curvas de crescimento das forrageiras sob sua infestação (Rayburn *et al.*, 2020).

3.4 Capacidades Competitivas das Espécies Forrageiras

O cultivar Marandu (*Urochloa brizantha*) apresentou o maior potencial de produção absoluta na ausência de competição (45,63 g) (Tabela 2). No entanto, as análises de regressão revelaram que essa espécie é a mais sensível ao aumento da densidade de plantas daninhas em solo sem correção. O declínio acentuado na MSPA sugere que o Marandu adota uma "estratégia de escape": é altamente competitivo em ambientes férteis, mas perde eficiência quando recursos essenciais (nitrogênio e fósforo) são disputados por plantas daninhas robustas como a *P. virgatum*.

Tabela 2 – Massa seca da parte aérea (MSPA) de gramíneas forrageiras tropicais sob diferentes níveis de infestação de *Paspalum virgatum* e *Sporobolus indicus*.

	A. gayanus	
População de Daninhas	*P. virgatum*	*S. indicus*
	Massa seca da parte aérea (g)	Massa seca da parte aérea (g)
0	10,1 Ab	3,87 Ba
2	25,6 Aa	3,56 Ba
4	18,56 Aa	2,42 Ba
6	18,8 Aa	1,2 Ba
10	22,09 Aa	4,5 Ba

12	7,57 Ab	3,78 Ba
Média	17,85	3,22
CV%		45,76
	U. Brizantha	
População de Daninhas	*P. virgatum*	*S. indicus*
	Massa seca da parte aérea (g)	Massa seca da parte aérea (g)
0	33,92 Aa	45,63 Aa
2	11,48 Ab	28,6 Aa
4	11,11 Ab	17,27 Aa
6	16,06 Ab	6,12 Bb
10	13,55 Ab	16,81 Aa
12	23,15 Aa	15,48 Ba
Média	22,74	22,64
CV%		29,25
	P. maximum	
População de Daninhas	*P. virgatum*	*S. indicus*
	Massa seca da parte aérea (g)	Massa seca da parte aérea (g)
0	31,73 Aa	10,49 Ba
2	19,59 Aa	11,55 Aa
4	15,94 Aa	5,87 Bb
6	6,1 Ab	4,25 Ab
10	10,14 Aa	5,82 Ab
12	5,21 Ab	0,95 Bc
Média	13,75	6,11
CV%		34,64

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha (comparando as espécies invasoras dentro de cada espécie forrageira) e pela mesma letra minúscula na coluna (comparando as espécies forrageiras dentro de cada densidade de planta daninha) não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV: Coeficiente de Variação.

Fonte: Autores, 2026.

O capim-massai demonstrou uma "estratégia de ocupação de nicho". Suas curvas de regressão mostraram uma redução gradual da biomassa, sustentada por sua alta taxa de perfilhamento. Essa característica morfológica permitiu ao Massai manter a cobertura do solo (Garcia-Carvalho *et al.*, 2025), o que se refletiu em menores valores de biomassa para a *S. indicus*, confirmando que a arquitetura da planta é tão importante quanto a biomassa absoluta no controle cultural de plantas daninhas.

O desempenho mais resiliente foi observado no *Andropogon gayanus*. Suas curvas de regressão tenderam a uma estabilidade horizontal, indicando que sua biomassa foi minimamente afetada pelo aumento da densidade de plantas daninhas. Enquanto outras espécies foram impactadas pela competição, o Andropogon manteve uma produtividade estável mesmo em densidades de até 12 plantas por vaso. Essa "estratégia de tolerância" é característica de espécies

adaptadas a solos de baixa fertilidade, onde o uso eficiente de recursos escassos supera a necessidade de crescimento rápido (Ens *et al.*, 2015).

3.5 Síntese Comparativa

Ao comparar as estratégias, fica claro que para a recuperação de áreas degradadas com alta pressão de *P. virgatum*, o Andropogon e o Massai oferecem maior confiabilidade biológica do que o Marandu. A ausência de fertilização e calagem atuou como um filtro, demonstrando que a capacidade competitiva é fortemente dependente do manejo do solo (Souza *et al.*, 2023).

Pode-se concluir que a seleção de forrageiras deve considerar não apenas o potencial de produção, mas também a capacidade de persistir sob estresse competitivo, sendo o *Andropogon gayanus* a espécie mais adequada para sistemas de baixo uso de insumos com alta infestação de plantas daninhas (Silva, 2023).

4 CONCLUSÃO

O estudo confirma que a competição interespecífica exercida pelas plantas daninhas *Paspalum virgatum* e *Sporobolus indicus* reduz significativamente o acúmulo de biomassa em gramíneas forrageiras tropicais sob condições de solo degradado. Embora o cultivar Marandu seja altamente produtivo sob condições ideais, ele demonstra alta sensibilidade à infestação inicial, enquanto o capim-massai exibe a resposta mais previsível e estatisticamente melhor ajustada à interferência das plantas daninhas (Patel *et al.*, 2023). Entre as espécies avaliadas, o *Andropogon gayanus* destaca-se por sua estabilidade produtiva, sugerindo que é uma opção resiliente para sistemas de baixo uso de insumos. Pode-se concluir que o controle populacional rigoroso de plantas daninhas é indispensável, visto que a ausência de correção e fertilização do solo potencializa a agressividade competitiva das plantas invasoras sobre as pastagens cultivadas (Marchi *et al.*, 2017).

Agradecimentos e financiamento

À Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e ao Centro de Ciências Agrárias, pela oportunidade de realização deste trabalho e pela infraestrutura concedida. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos, fundamental para a dedicação e viabilização desta pesquisa. Expresso meus sinceros agradecimentos aos membros do Grupo de Estudos em Ciências Agrárias (GECA) e do Grupo de Pesquisa das Agrárias (GPA), pelo suporte técnico, discussões valiosas e colaboração mútua em todas as etapas de condução dos experimentos. Por fim, agradeço a todos os sujeitos, professores, técnicos e colegas que, direta ou indiretamente, colaboraram com dedicação para a concretização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, R. P. **O Capim-Andropogon (*Andropogon gayanus* Kunth): Características e Manejo**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2010. (Comunicado Técnico).

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A. Análise de solo e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 2004.

BORGHI, E. *et al.* **Adoção de técnicas de manejo para recuperação de pastagens degradadas**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2018. (Documentos).

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Manual de identificação e controle de plantas daninhas em pastagens**. Brasília, DF: MAPA, 2012.

CAMARÃO, A. P.; SOUZA FILHO, A. P. S. ***Urochloa brizantha* cv. Marandu: Características e Manejo**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2005.

CARVALHO, J. D. S. *et al.* Over-liming in the Construction of the Fertility of Red Yellow Latosol with Different Phosphorus Sources. **International Journal of Plant and Soil Science**, p. 99-106, 2020.

DE OLIVEIRA, G. S. *et al.* Interferência de plantas daninhas na implantação e rebrota de pastagem de *Panicum maximum* cv. Massai. **Agrarian**, v. 13, n. 48, p. 178-186, 2020.

DIAS-FILHO, M. B. **Diagnóstico da degradação de pastagens no Brasil**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2014. 36 p. (Documentos, 401).

ENS, E.-J. *et al.* Indigenous and non-indigenous knowledge partner to manage an invasive weed in pasture and natural ecosystems. **Journal of Environmental Management**, 2015.

ERASMO, E. A. L. *et al.* Potencial alelopático de sementes de *Paspalum virgatum* e *Sporobolus indicus*. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 22, n. 3, p. 401-406, 2004.

FERRELL, J. A. *et al.* Weed management in clover and other forage legumes. **EDIS**, v. 2006, n. 4, 2006

FERRELL, J. *et al.* Competition of giant smutgrass (*Sporobolus indicus*) in a bahiagrass pasture. **Weed Science**, v. 54, p. 100-105, 2006.

FOXX, A. J.; FORT, F. Root and shoot competition lead to contrasting competitive outcomes under water stress: A systematic review and meta-analysis. **PLoS ONE**, v. 14, 2019.

GALVÃO, A. K. L. *et al.* Efeito do sombreamento sobre a morfologia de *Paspalum virgatum*. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 733-739, 2011.

GARCIA-CARVALHO, L. F. *et al.* Tillering dynamics and population stability of three tropical forage grasses cultivated as pure or mixed stands. **The Journal of Agricultural Science**, 2025.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa da Pecuária Municipal**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

LOUSADA, L. L.; AMARAL, C. L.; COSTA, N. L. Habilidade competitiva de cultivares de *Panicum maximum* com plantas daninhas. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 16, p. 1198, 2013.

MARCHI, S. *et al*. Levantamento fitossociológico de plantas daninhas em áreas de pastagem regenerada ou cultivada. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 12, n. 3, p. 295-302, 2017.

MARTUSCELLO, J. A. **Manejo de Pastagens e Produção Animal**. Viçosa: Ed. UFV, 2022.

MITJA, D.; ROBERT, P. Des agriculteurs innovateurs : une nouvelle graminée dans les pâturages de Santa Maria (*Amazonie brésilienne*). **Natures Sciences Sociétés**, v. 12, p. 285-298, 2004.

PATEL, R. *et al.* Competitive skill of *Paspalum virgatum* L. e o *Panicum maximum* cv. Mombaça in different soil fertilities. **Concilium**, 2023.

PIVETTA, J. P. *et al.* Interferência de plantas daninhas na produtividade de cultivares de *Urochloa*. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 9, n. 3, p. 1-10, 2010.

RAYBURN, E.; GRIGGS, T. Light Interception and the Growth of Pastures under Ideal and Stressful Growing Conditions on the Allegheny Plateau. **Plants**, v. 9, 2020.

RUAS, M. A. O. *et al.* Effect of *Urochloa brizantha* density on competition with *Myracrodruon urundeuva*. **Bioscience Journal**, 2025.

SILVA, F. C. (Org.). **Manual de análise química de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informações Tecnológicas, 2009. 627 p.

SILVA, M. C. *et al.* Crescimento e acúmulo de forragem de gramíneas tropicais sob diferentes condições de competição. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 52, e20220089, 2023.

SOUZA FILHO, A. P. S.; ALVES, S. M.; DUTRA, S. Estádio de desenvolvimento e estresse hídrico e as potencialidades alelopáticas do capim-marandu. **Planta Daninha**, v. 20, p. 25-31, 2002.

SOUZA FILHO, A. P. S.; RODRIGUES, L. R.; RODRIGUES, T. J. Potencial Alelopático de Forrageiras Tropicais: Efeitos Sobre Invasoras de Pastagens. **Planta Daninha**, v. 15, n. 1, p. 53-60, 1997.

SOUZA, G. S. *et al.* Phytosociological survey of weeds in cultivated pastures under different management intensities. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 18, n. 2, e202301, 2023.

SPADER, T.; MATERA, J. Controle químico do capim-andropogon com herbicidas sequenciais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 2010.

SPADOTTO, C. A.; GOMES, M. A.; LUCHINI, L. C. Monitoramento de resíduos de herbicidas em água e solo. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, Curitiba, 2004.

PARTE IV — RESISTÊNCIA DE PLANTAS E MANEJO DE INSETOS-PRAGA

CAPÍTULO 14

RESISTÊNCIA DE GENÓTIPOS DE *Urochloa ruziziensis* A *Deois schach* E *Mahanarva spectabilis*

Everton Augusto Francisco Rosa
Bolsista de Pesquisa de Melhoramento genético - Embrapa Gado de Leite – Juiz de Fora – MG, Brasil

Maria Alice dos Santos Alves
Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais, Campus-Barbacena. Bolsista Iniciação Científica FAPEMIG - Embrapa Gado de Leite, Brasil

Fausto Souza Sobrinho
Pesquisador – Embrapa Gado de Leite – Juiz de Fora – MG, Brasil

Alexander Machado Auad
Pesquisador – Embrapa Gado de Leite – Juiz de Fora – MG, Brasil

DOI: 10.52832/wed.221.1311

Resumo: As pastagens desempenham um papel fundamental na economia brasileira, visto que a maior parte do rebanho bovino nacional é criada em sistema extensivo. Contudo, a produtividade e a longevidade dessas áreas são constantemente ameaçadas pelo ataque das cigarrinhas-das-pastagens, que diminuem a produção e degradam os pastos. Dentre as forrageiras *Urochloa ruziziensis* destaca-se pelo elevado potencial produtivo e pela aptidão para sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF); no entanto, é historicamente classificada como uma das espécies mais suscetíveis a esses insetos-praga. Como alternativa, programas de melhoramento genético têm apostado na seleção recorrente para identificar e desenvolver cultivares resistentes. Diante disso, este estudo avaliou genótipos de *U. ruziziensis* submetidos à infestação por ninfas de *Deois schach* e *Mahanarva spectabilis*. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, sob o delineamento em blocos casualizados (DBC). Os resultados revelaram genótipos promissores com resistência às ninfas do inseto-praga frente à *D. schach*, que se mostrou a espécie mais agressiva. Conclui-se que a *U. ruziziensis* dispõe de variabilidade genética e genótipos potenciais para o lançamento de futuras cultivares resistentes às cigarrinhas-das-pastagens.

Palavras-chave: Cigarrinha-das-pastagens. Forrageiras. Melhoramento. *Brachiaria ruziziensis*.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores de leite e carne bovina do mundo (MAPA, 2025), sendo a maior parte do seu rebanho criada a pasto e a maioria destes pastos são de gramíneas do gênero *Urochloa* (Simeão, 2016), sendo um grupo de plantas bastante afetado pelas cigarrinhas-das-pastagens. A fase jovem da praga, a ninfa, vive na base da planta sugando o xilema e produzindo uma espuma que serve como abrigo e proteção, já o adulto suga a folha causando clorose e "queima" dos pastos (Resende *et al.*, 2013).

O ataque dessas pragas prejudica a qualidade da forragem, seu desenvolvimento e produtividade (Resende; Auad; Fonseca, 2014), gerando efeito negativo no rebanho e prejuízo ao produtor. A espécie *U. ruziziensis* (sin. *Brachiaria* ruziziensis) é bastante produtiva e de boa qualidade nutricional, porém muito suscetível às cigarrinhas-das-pastagens, o que limita seu uso na pecuária leiteira, apesar disso é a espécie mais indicada para sistemas de ILPF (Souza Sobrinho *et al.*, 2022).

Dentre as técnicas de manejo do inseto a diversificação de pastagens e uso de materiais resistentes são os principais métodos (Alvarenga *et al.*, 2017). A resistência de gramíneas às cigarrinhas-das-pastagens pode se dar por antibiose, antixenose e tolerância. Antibiose é o efeito de metabólitos produzidos pelas plantas que afetam o desenvolvimento e reprodução dos insetos (Gusmão; Valério; Auad, 2013). Miles *et al.* (1995) sugeriram que a resistência de gramíneas (*Urochloa*) as cigarrinhas-das-pastagens poderia ser manipulada em programas de melhoramento genético, observando valores satisfatórios de herdabilidade.

Estudos de Auad *et al.* (2011) já demonstravam clones de *U. ruziziensis* com sobrevivência ninfal abaixo de 40% em testes de antibiose com *M. spectabilis*. Posteriormente, Auad *et al.* 2013 observaram clones da mesma espécie de forrageira resistente à *Mahanarva fimbriolata* e *Notozulia*

entreriana. Corroborando com essa tendência, Auad *et al.* (2015) identificaram sobrevivência ninfal inferiores a 30% de *Deois schach* em clones diploides e tetraploides de *U. ruziziensis* advindos de populações submetidas a seleção recorrente. Recentemente, Resende *et al.* (2024) consolidaram essa tendência ao demonstrar o avanço contínuo da resistência às cigarrinhas-das-pastagens em genótipos de *U. ruziziensis* ao longo de 16 anos de seleção recorrente. Esses estudos evidenciam que é possível obter genótipos de *U. ruziziensis* resistentes aos cercopídeos, tendo potencial para desenvolver cultivares resistentes.

Visto que as espécies de cigarrinha das pastagens *Deois schach* e *Mahanarva spectabilis* são as mais comuns na região de Juiz de Fora -MG (Auad, 2025), este estudo objetivou avaliar genótipos de *U. ruziziensis* quanto a resistência a essas duas espécies de cigarrinha-das-pastagens.

2 METODOLOGIA

Genótipos *de Urochloa ruziziensis*, provenientes do programa de melhoramento de forrageiras das Embrapa Gado de Leite, foram cultivadas em tubetes de 8cm de altura e 5cm de diâmetro com substrato comercial (Carolina Soil® — Composição: grama de esfagno, vermiculita expandida, calcário dolomítico, gesso agrícola e fertilizante NPK). A cultivar *Urochloa brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf (sinônimo *Brachiaria brizantha*) cv. Marandu foi o padrão utilizado como resistente e a cultivar *Urochloa decumbens* Stapf (sinônimo *Brachiaria decumbens*) cv. Basilisk como padrão suscetível. Os tubetes com as plantas foram colocados sob tubetes vazios para desenvolver raízes expostas, que consistia de sítio de alimentação para as ninfas.

As cigarrinhas-das-pastagens utilizadas no experimento provieram de adultos que foram coletados no campo experimental da Embrapa Gado de Leite, localizado em Coronel Pacheco - MG, e levados para laboratório de entomologia. Cada espécie foi colocada em gaiolas de acrílico com plantas adequadas a sua alimentação e gaze úmida no fundo para a oviposição. Após alguns dias as gazes foram retiradas e lavadas, com auxílio de peneiras para separação dos ovos. Os ovos coletados foram colocados em placas de petri com papel filtro e acondicionados em BOD a temperatura 25 ± 2°C e 70% ± 10% de umidade relativa, até que atingissem o estágio S4.

O experimento foi conduzido em casa de vegetação em delineamento em blocos inteiramente casualizados (DBC), com 20 repetiçoes. Cada planta recebeu 6 ovos de cigarrinha das pastagens em estágio S4 (próximo à eclosão). Após 30 dias foram avaliadas as taxas de sobrevivência das ninfas. Foram feitas duas fases, na primeira foram testados dois genótipos de *U. ruziziensis* e duas espécies de cigarrinha-das-pastagens *Deois schach* e *Mahanarva spectabilis*. A espécie mais agressiva na primeira fase foi testada em 20 genótipos de *U. ruziziensis*. Os dados foram

submetidos à análise de variância, e as médias da porcentagem de sobrevivência foram comparadas pelo teste de Scott-Knott ($p<0.05\%$).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Constatou-se diferenças significativas para a sobrevivência ninfal entre os genótipos de *U. ruziziensis* e as testemunhas ($F = 7,5$ e $p = 0,0001$), entre as espécies de praga ($F = 10,9$ e $p = 0,0014$), porém a interação entre os fatores não foi significativa ($F = 0,088$ e $p = 1,0$). Evidencia-se, portanto, que a seleção dos genótipos de *U. ruziziensis* não é influenciada pela espécie de cigarrinha empregada na avaliação, podendo ser realizada com base na média das duas espécies

Para *Deois schach* e *Mahanarva spectabilis*, os genótipos CNPGL 1 e CNPGL 2 proporcionaram as menores médias de sobrevivência ninfal (19,64 ±3,7% e 31,33 ±5,8 %, respectivamente) igual a testemunha resistente (32,69 ± 6,5), diferindo significativamente das testemunhas suscetível, *U. decumbens* (48,04%). Quando avaliado o efeito das espécies de cigarrinha, verificou-se que *M. spectabilis* apresentou menor sobrevivência (24,17 ± 3,6%) em comparação à *D. schach* (41,52 ± 4,9%).

Assim, a espécie *D. schach* se mostra mais adaptada às forrageiras testadas, o que corrobora sua ampla presença na região (Auad *et al.*, 2025). Já o gênero *Mahanarva* geralmente está associado a gramíneas de maior porte, o que poderia explicar a menor sobrevivência de *M. spectabilis* nos genótipos de *U. ruziziensis*. Embora estudos de Rosa *et al.* (2025) e Silva *et al.* (2017) não demonstrem preferência alimentar desta espécie entre *U. ruziziensis* e *Pennisetum purpureum*. A menor performance de *M. spectabilis*, observada neste trabalho, pode estar associada ao fato do programa de melhoramento genético da Embrapa Gado de Leite ter realizado a maior parte das avaliações empregando essa espécie de cigarrinhas (Resende et al. 2024).

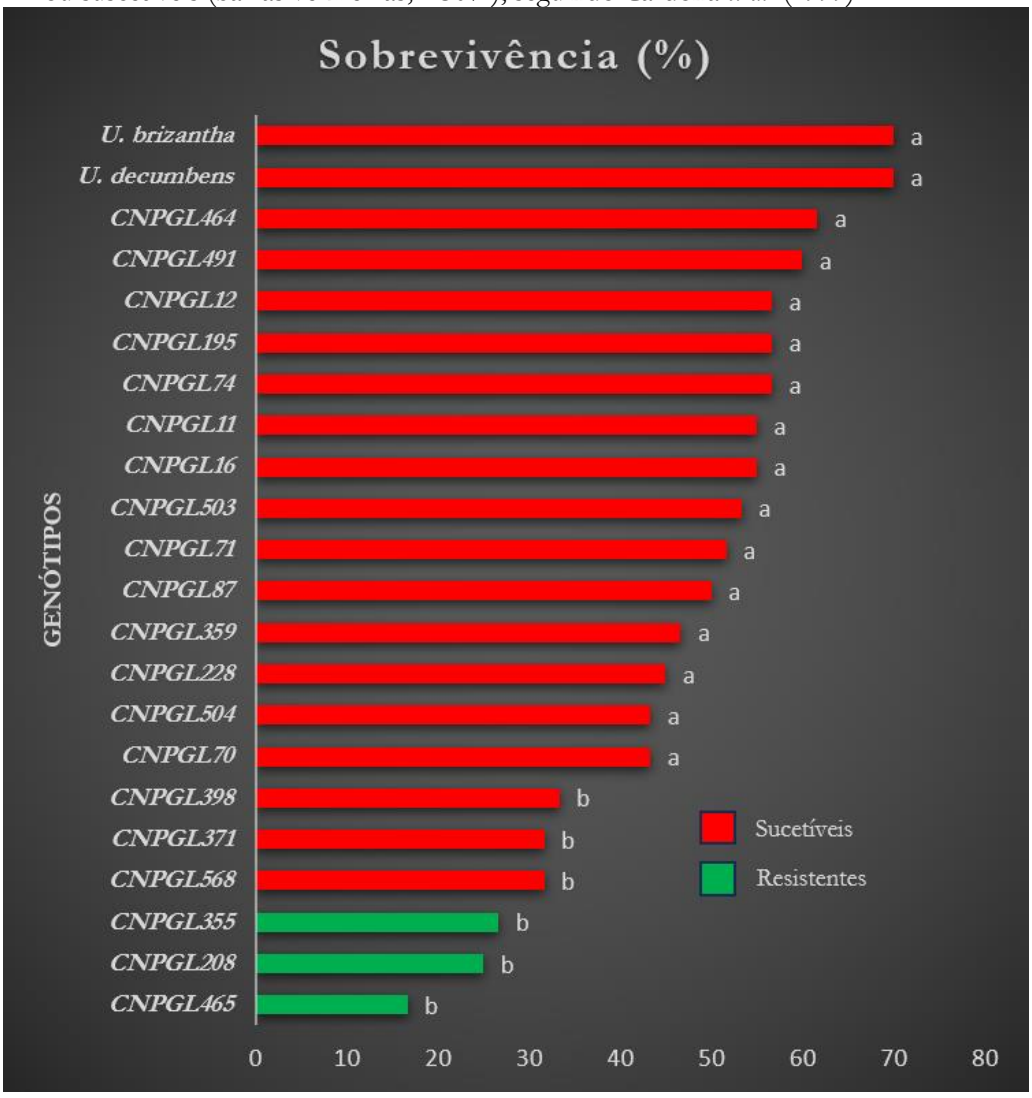
Segundo o critério de Cardona *et al.* (1999), genótipos que proporcionam sobrevivência ninfal inferior a 30% são classificados como resistentes. Com isso, os genótipos CNPGL 1 e CNPGL 2 são classificados como resistentes a *M. spectabilis*, porém comportam-se como suscetíveis a *D. schach*.

Como a *D. schach* mostrou-se mais agressiva, foi a espécie empregada na segunda fase do experimento. Nesta etapa, constatou-se a existência de variabilidade genética entre os genótipos testados. O teste de médias separou um grupo de seis materiais com médias de sobrevivência ninfal significativamente inferiores aos demais, diferenciando-se inclusive das testemunhas. Nesta fase, o padrão de resistência (*Urochloa brizantha* cv. Marandu) apresentou sobrevivência alta e não diferiu estatisticamente da testemunha suscetível (*Urochloa decumbens* cv. Basilisk), evidenciando que a

população de insetos utilizada se demonstrou adaptada aos mecanismos de defesa da cultivar Marandu (Figura 1).

Apesar do desafio imposto pela agressividade da população de insetos, três desses seis genótipos destacados estatisticamente podem ser classificados como resistentes, pois mantiveram a sobrevivência ninfal abaixo do limite de 30% estabelecido pela escala de Cardona *et al.* (1999). Resultados que demonstram resistência de genótipos de *U. ruziziensis* a espécies de cigarrinha-das-pastagens também foram reportados por Auad et al. (2011), Auad et al. (2013) e Toledo et al. (2015).

Figura 1 - Sobrevivência ninfal de *D. schach* em progênies melhoradas de *U. ruziziensis*, e nas testemunhas suscetível (*U. decumbens*) e resistente (*U. brizantha*). Barras com a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott–Knott (p<0,05). As progênies foram classificadas como resistentes (barras verdes, ≤ 30%) ou suscetíveis (barras vermelhas; >30%), seguindo Cardona *et al.* (1999).



Fonte: Autores, 2026.

4 CONCLUSÃO

Os genótipos de *U. ruziziensis* apresentam resistência específica a depender da praga, sendo mais vulneráveis a *D. schach*. Apesar disso, três genótipos se destacaram como promissores por reduzirem a sobrevivência ninfal de *D. schach* a menos de 30%, constituindo fontes potenciais de resistência para o melhoramento genético.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brazil (Finance Code 307956/2023-7) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais-FAPEMIG, Brazil (CAG APQ-02653-23; APQ-03630-23), and Associação para o Fomento à Pesquisa de Melhoramento de Forrageiras — UNIPASTO, Brazil.

REFERÊNCIAS

AUAD, A. M. *et al*. Seleção de clones de *Brachiaria ruziziensis* resistentes a *Mahanarva spectabilis* (Hemiptera: Cercopidae). **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, [s. l.], 2011.

AUAD, A. M. *et al*. Seleção de clones de *Brachiaria ruziziensis* quanto a resistência à *Mahanarva spectabilis*. In: CONGRESSO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UFLA, 22., 2013, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA, 2013. p. 4.

AUAD, A. M.; RESENDE, T. T.; OLIVEIRA, C. M. A decade of sampling reveals spittlebug population dynamics in different cultivation system. **Global Ecology and Conservation**, [s. l.], e03534, 2025.

ALVARENGA, R. *et al*. Spittlebugs (Hemiptera: Cercopidae) and their host plants: a strategy for pasture diversification. **Applied Entomology and Zoology**, v. 52, n. 4, p. 653-660, 2017.

CARDONA, C.; MILES, J. W.; SOTELO, G. An improved methodology for massive screening of *Brachiaria* spp. genotypes for resistance to *Aeneolamia varia* (Homoptera: Cercopidae). **Journal of Economic Entomology**, [s. l.], v. 92, n. 2, p. 490-496, 1999.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Mapa do leite**. Brasília, DF: MAPA, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/producao-animal/mapa-do-leite. Acesso em: 8 maio 2026.

GUSMÃO, M. R.; VALÉRIO, R. J.; AUAD, A. M. Ideótipos de gramíneas resistentes às cigarrinhas-das-pastagens (Hemiptera: Cercopidae). In: SOUZA, F. H. D.; MATTA, F. P.; FÁVERO, A. P. **Construção de ideótipos de gramíneas para uso diverso**. Brasília, DF: Embrapa, 2013.

MILES, J. W. *et al*. Inheritance of resistance to spittle bug (Homoptera: Cercopidae) in inter specific *Brachiaria* spp. hybrids. **Journal of Economic Entomology**, [s. l.], v. 88, n. 5, p. 1477-1481, 1995.

RESENDE, T. T. *et al.* Sixteen years of recurrent selection of ruzi grass for resistance to spittlebugs (Hemiptera: Cercopidae). **Agronomy**, [s. l.], v. 14, n. 7, p. 1516, 2024.

RESENDE, Tiago Teixeira et al. The damage capacity of *Mahanarva spectabilis* (Distant, 1909)(Hemiptera: Cercopidae) adults on *Brachiaria ruziziensis* pasture. **The Scientific World Journal**, v. 2013, n. 1, p. 281295, 2013.

RESENDE, T. T.; AUAD, A. M.; FONSECA, M. G. How many adults of *Mahanarva spectabilis* (Hemiptera: Cercopidae) should be used for screening *Brachiaria ruziziensis* (Poales: Poaceae) resistance?. **Journal of Economic Entomology**, v. 107, n. 1, p. 396-402, 2014.

ROSA, E. A. F. *et al.* **Preferência alimentar de cigarrinhas-das-pastagens em resposta às espécies de forrageiras ofertadas**. [S. l.: s. n.], 2025.

SILVA, S. E. B. *et al.* Biological performance and preference of *Mahanarva spectabilis* (Hemiptera: Cercopidae) for feeding on different forage plants. **Journal of Economic Entomology**, [s. l.], v. 110, n. 4, p. 1877-1885, 2017.

SIMEÃO, R. *et al.* Genetic evaluation and selection index in tetraploid *Brachiaria ruziziensis*. **Plant Breeding**, [s. l.], v. 135, n. 2, p. 246-253, 2016.

SOUZA SOBRINHO, F. de *et al.* **BRS Integra: nova cultivar de *Urochloa ruziziensis* para a ILPF**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2022. (Comunicado Técnico).

TOLEDO, A. M. O. *et al.* Seleção de genótipos de *Brachiaria ruziziensis* (Germain & Edvard) resistentes à *Deois schach* (Fabricius, 1787) (Hemiptera: Cercopidae). In: SEMANA DE BIOLOGIA DA UFJF, 2015, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora: UFJF, 2015. p. 1-3.

CAPÍTULO 15

SELEÇÃO RECORRENTE DO CAPIM-ELEFANTE QUANTO A RESISTÊNCIA À CIGARRINHAS-DAS-PASTAGENS

Maria Alice dos Santos Alves
Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais, Campus-Barbacena. Bolsista Iniciação Científica FAPEMIG - Embrapa Gado de Leite, Brasil

Everton Augusto Francisco Rosa
Bolsista de Pesquisa de Melhoramento genético - Embrapa Gado de Leite – Juiz de Fora – MG, Brasil

Thales Freires Mendonça
Bolsista Iniciação Científica FAPEMIG – Embrapa Gado de Leite – Juiz de Fora – MG, Brasil

Juarez Campolina Machado
Pesquisador – Embrapa Gado de Leite – Juiz de Fora – MG, Brasil

Alexander Machado Auad
Pesquisador – Embrapa Gado de Leite – Juiz de Fora – MG, Brasil

DOI: 10.52832/wed.221.1312

Resumo: A elevada suscetibilidade das pastagens à *Mahanarva spectabilis* (Hemiptera: Cercopidae) tem proporcionado o aumento de pesquisas voltadas ao melhoramento de cultivares resistentes, uma vez que este inseto-praga constitui o principal problema biótico das plantas forrageiras, dificultando seu manejo em áreas com ocorrência. Deste modo, o objetivo do trabalho é identificar genótipos de capim-elefante resistentes à cigarrinha das pastagens em duas populações propagadas por sementes: i) segundo ciclo de seleção recorrente para produção de silagem e biomassa energética e ii) primeiro ciclo de seleção recorrente para uso sob pastejo. O experimento foi conduzido em blocos aumentados de Federer, sendo avaliadas 275 progênies/população, das quais 174 correspondiam à população i) e 101 à população ii), utilizando-se como testemunhas as cultivares Pioneiro (resistente) e BRS Capiaçu (suscetível). Os níveis de sobrevivência ninfal variaram entre 0 e 100%; a população i) apresentou elevado índice de sobrevivência das ninfas, com 92,53% de plantas apresentando valores superiores a 51%. Já a população ii), apenas 61,39%, apresentou sobrevivência ajustada superior a 51%. Destarte, indica-se a continuidade do programa de seleção recorrente, utilizando progenitores cuja sobrevivência ninfal tenha sido de até 30%, visto que nos ciclos analisados não foi observada estabilidade da sobrevivência.

Palavras-chave: Antibiose. Forragens. *Mahanarva spectabilis*. MIP.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta uma área de 160 milhões de hectares de pastagens, das quais 50% são cultivadas (EMBRAPA, 2017). Diante disso, a intensificação da produção animal impulsionou a demanda por aumento na produtividade e qualidade das pastagens. Consequentemente, intensificaram-se as pesquisas voltadas para o melhoramento de cultivares resistentes às cigarrinhas-das-pastagens (Hemiptera: Cercopidae) (Auad *et al*., 2007; Auad *at al*., 2024; Neves *et al*., 2025); visto que esse inseto-praga constitui o principal problema biótico das forrageiras, limitando o cultivo em áreas com histórico de ocorrência, com aproximadamente 10 milhões de hectares de gramíneas, causando prejuízos que variam entre 10% e 100% (Auad; Fonseca; Resende, 2017).

O desafio no melhoramento de cultivares não suscetíveis reside em desenvolver um ideótipo que inclua diferentes mecanismos de defesa, integrando a tolerância, permitindo que a planta suporte a lesão causada pelos indivíduos adultos e, simultaneamente manifeste a antibiose contra a fase imatura, produzindo compostos que altere a performance da cigarrinhas-das-pastagens (Espitia Buitrago; Manzano; Hernández, 2022; Resende *et al*, 2024). Essa abordagem constitui uma alternativa viável para reduzir os custos de produção e manter o equilíbrio do ecossistema, favorecendo sistemas agrícolas mais resilientes (Bommarco, 2024).

Neste âmbito, estudos conduzidos por Auad *et al.* (2007); Auad *et al.* (2024); Neves *et al.* (2025) identificaram genótipos promissores de capim-elefante, que proporcionam menor sobrevivência ninfal de *Mahanarva spectabilis* (Distant, 1909) (Hemiptera: Cercopidae); porém, os níveis de sobrevivência ainda são elevados, o que demanda a incorporação de novos alelos de resistência. Para tanto, a seleção recorrente surge como uma estratégia eficaz, pois permite conduzir

a seleção por ciclos sucessivos com base em características de interesse (Cargnin, 2007; Acquaah, 2020), tornando-se uma ferramenta viável no manejo de *M. spectabilis* em capim-elefante.

Assim, objetivou-se identificar genótipos de capim-elefante resistentes a *M. spectabilis* em duas populações de capim-elefante a serem propagadas por sementes: i) segundo ciclo de seleção recorrente em população para produção de silagem e biomassa energética e ii) primeiro ciclo de seleção recorrente em população para uso sob pastejo(capim-elefante-anão).

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas sementes advindas de materiais genéticos com aptidão para sistema de capineira, silagem e produção de bioenergia, selecionados pelo programa de melhoramento da Embrapa Gado de Leite, por apresentarem menor sobrevivência ninfal no primeiro ciclo de cruzamento realizado em 2025. Paralelamente, obtiveram-se sementes de uma população de capim-elefante com aptidão para pastejo (capim-elefante anão) para realização do primeiro ciclo de seleção recorrente. As sementes foram semeadas e acondicionadas em tubetes até o momento do transplante.

O experimento foi conduzido no delineamento de blocos aumentados de Federer, avaliando-se 275 progênies/população ao todo, nas quais 174 correspondiam a população para produção de silagem e biomassa energética (segundo ciclo de seleção recorrente) e 101 à população para uso sob pastejo (primeiro ciclo de seleção recorrente), e como testemunha foram utilizados as cultivares Pioneiro (resistente) e BRS Capiaçu (suscetível)

Adultos de *M. spectabilis* foram coletados no Campo Experimental da Embrapa Gado de Leite, em Coronel Pacheco, MG, e alocados no laboratório de Entomologia da mesma instituição. Os insetos foram mantidos em gaiolas de acrílico para oviposição, seguindo a metodologia proposta por Auad *et al.* (2024). Em seguida, os ovos foram lavados, esterilizados e transferidos para placas de Petri (9 cm de diâmetro), sendo mantidos em câmara climatizada a 25 ± 2 ºC, fotofase de 14 horas e umidade relativa de 70 ± 10%, até atingirem o estádio S4, imediatamente antes da eclosão.

Ao atingirem a altura desejada (30 cm), as plantas foram transplantadas para vasos com capacidade de 300 mL, tendo suas raízes deixadas expostas, facilitando o acesso das ninfas para alimentação. Após o transplantio, cada vaso recebeu seis ovos de *M. spectabilis* em estádio S4, sendo vedado com uma tampa plástica contendo um furo circular central, que permitia a passagem do colmo da planta, posteriormente coberto com gaze para impedir o escape das ninfas pela abertura.

Passados 35 dias da deposição dos ovos, foi contabilizado o número de ninfas sobreviventes entre o segundo e o quinto instares, sendo esses dados utilizados para o cálculo da

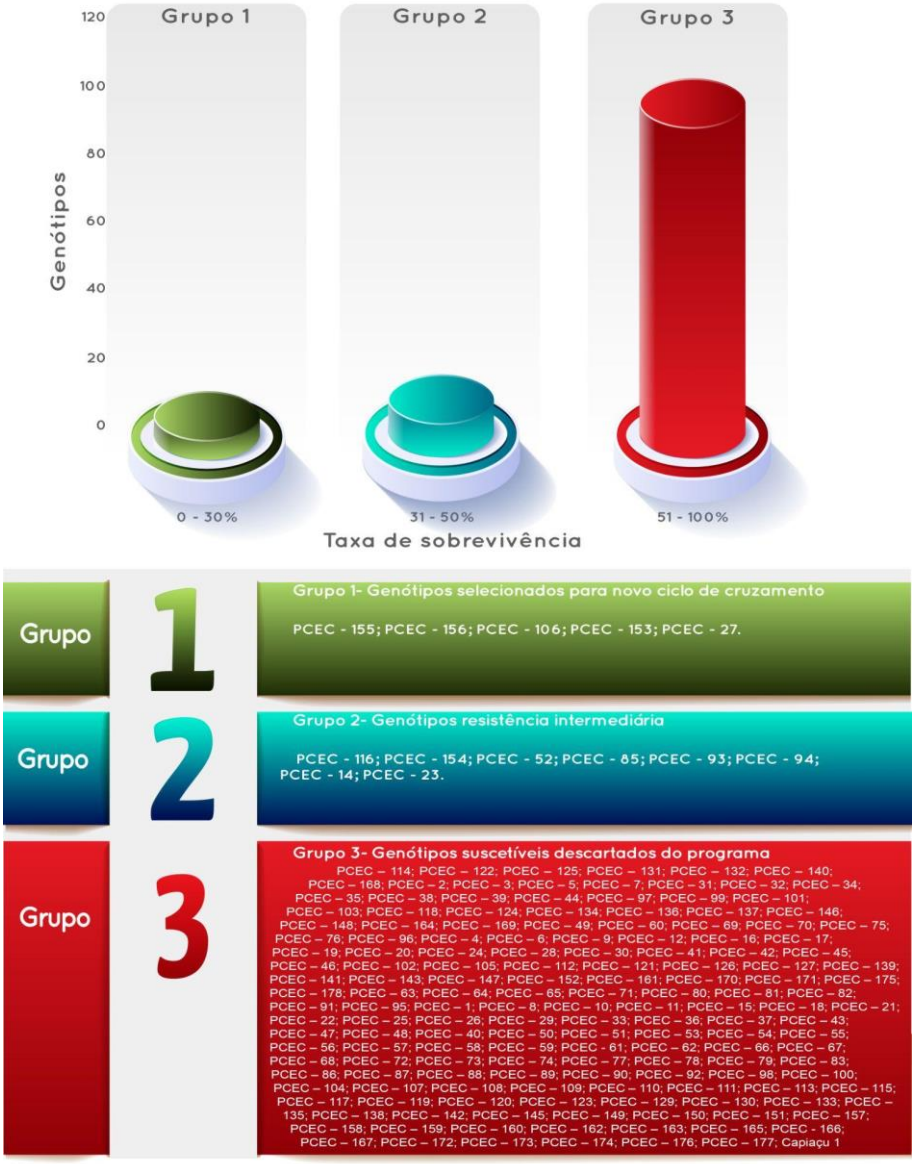
porcentagem de sobrevivência ninfal. Realizou-se uma análise gráfica da frequência dos genótipos conforme a taxa de sobrevivência ninfal, os quais foram agrupados em três grupos distintos: (i) genótipos resistentes, com sobrevivência ninfal igual ou inferior a 30%; (ii) genótipos com resistência intermediária, com sobrevivência entre 31% e 50%; e (iii) genótipos suscetíveis, com sobrevivência superior a 51%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As plantas da população melhorada de capim-elefante para produção de silagem e biomassa energética, avaliadas no segundo ciclo de seleção, quanto à resistência a *M. spectabilis* apresentaram níveis de sobrevivência ninfal variando entre 0 e 100%, o que caracteriza a manutenção de uma ampla variabilidade. Neves *et al.* (2025), também registraram alta variabilidade no primeiro ciclo de seleção recorrente de capim-elefante quanto à resistência à mesma espécie-praga avaliada na presente pesquisa.

Destaca-se que os materiais previamente selecionados como resistentes, no primeiro ciclo de seleção, não mantiveram a baixa sobrevivência ninfal no ciclo atual, embora tivesse sido selecionados como progenitores apenas as plantas que apresentaram sobrevivência ninfal abaixo de 10% no ciclo anterior, evidenciando a importância de sucessivas avaliações até que a resistência seja efetivamente confirmada e estabilizada. De acordo com a figura 1, esse comportamento sugere baixa estabilidade da expressão genética associada à resistência a *M. spectabilis*, uma vez que apenas cinco genótipos (2,87%) apresentaram sobrevivência entre 0 e 30%, (consideradas resistentes) oito genótipos (4,60%) situam-se na faixa de 31 a 50%, e 161 genótipos (92,53%) apresentaram valores superiores a 51%.

Figura 1 – Sobrevivência média ninfal (%) de *M. spectabilis* em 174 genótipos de capim-elefante para produção de silagem e biomassa energética e distribuição de frequência dos genótipos testados (%) com sobrevivência ninfal de 0 a 30% (Resistentes); 31 a 50% (Resistência intermediária) e acima de 51%.



Fonte: Autores, 2026.

Estes resultados indicam que o segundo ciclo foi insuficiente para selecionar um número expressivo de plantas capazes de reduzir a sobrevivência do inseto-praga. A elevada proporção de materiais suscetíveis sugere que a resistência à cigarrinha-das-pastagens apresenta controle genético complexo, possivelmente envolvendo diversos genes e com forte influência ambiental sobre sua expressão.

Essa complexidade converge com os achados de Auad *et al.* (2024), que, em bioensaios conduzidos entre 2008 e 2024, concluiu que nenhum dos genótipos avaliados apresentou taxa de sobrevivência do inseto inferior a 30%, e menos de 10% ficaram abaixo de 50%. De forma similar,

Perez *et al.* (2019) verificaram que genótipos de *C. purpureum* manifestaram alta suscetibilidade à praga, tanto por mecanismos de antibiose quanto de tolerância, reforçando o desafio no desenvolvimento de materiais resistentes.

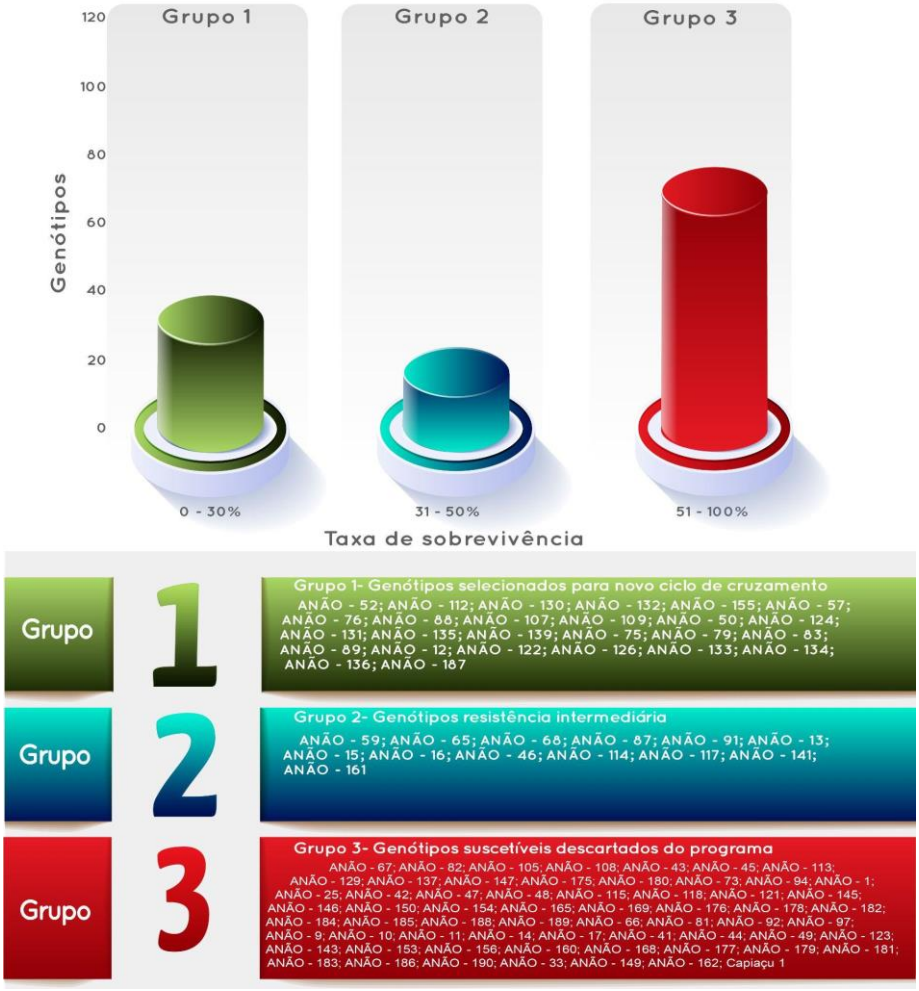
A predominância de genótipos com sobrevivência ninfal superior a 50% sugere que a resistência a *M. spectabilis,* ainda precisa de refinamento. Conforme apontado por Hallauer; Carena; Miranda Filho (2010); Resende *et al.* (2024), a resposta à seleção recorrente é incremental e demorada, dependendo estritamente da manutenção da variabilidade genética para permitir o acúmulo de alelos favoráveis ao longo das gerações. Portanto, os resultados atuais confirmam que dois ciclos fenotípicos foram insuficientes para concentrar os alelos de resistência, tornando imperativa a realização de ciclos adicionais.

No que tange aos genótipos com propósito de uso sob pastejo (capim-elefante anão), a figura 2 mostra que a análise de sobrevivência ninfal demonstrou que 26 genótipos (25,74%) apresentaram valores entre 0 e 30%, enquanto 13 genótipos (12,87%) ficaram na faixa de 31 a 50%. Contudo, a maioria dos materiais avaliados, correspondente a 62 genótipos (61,39%), exibiu sobrevivência ninfal superior a 51%, evidenciando predominância de genótipos com melhor desempenho quanto à sobrevivência. Esse cenário replica o panorama observado no primeiro ciclo da população de porte normal, no qual um elevado índice de sobrevivência ninfal (cerca de 62,39% dos genótipos) indicou alta suscetibilidade ao ataque da praga, fator que compromete a produtividade e a persistência da forrageira em sistemas de produção animal. Resultados semelhantes de suscetibilidade foram reportados por Auad *et al.* (2024) e Neves *et al.* (2025). Diante disso, tais materiais suscetíveis foram descartados para as etapas subsequentes do programa.

Em contraponto, Resende *et al.* (2024), concluiu que após 16 ciclos de seleção com a forrageira *Urochloa ruziziensis* ((R. Germ. e CM Evrard) Crins (sinônimo *Brachiaria ruziziensis*) (Poales: Poaceae)), cerca de 716 plantas, cujas taxas de sobrevivência ninfal foram iguais ou inferiores a 33%, são consideradas resistentes às ninfas de *D. schach* e *M. spectabilis*. Esse contraste ressalta o papel do avanço na fixação de caracteres de resistência após vários ciclos de seleção recorrente.

Diante do exposto, recomenda-se a continuidade do programa de seleção recorrente no capim-elefante propagado por sementes. Para tanto, devem ser utilizados como progenitores apenas os genótipos que propiciaram sobrevivência ninfal de até 30%, dado que os ciclos avaliados até o momento ainda não asseguram a estabilidade genotípica para essa característica na população analisada.

Figura 2 – Sobrevivência média ninfal (%) de *M. spectabilis* em 101 genótipos de capim-elefante para uso em pastejo (Porte anão) e distribuição de frequência dos genótipos testados (%) com sobrevivência ninfal de 0 a 30% (Resistentes); 31 a 50% (Resistência intermediária) e acima de 51%.



Fonte: Autores, 2026.

4 CONCLUSÃO

A seleção recorrente possibilitou a identificação de genótipos promissores com potencial de resistência a *Mahanarva spectabilis*. Contudo, devido à complexidade genética do caráter e à ausência de estabilidade fenotípica nos ciclos avaliados, recomenda-se a continuidade do programa por meio de ciclos adicionais de seleção. Essa estratégia é fundamental para elevar a frequência de alelos favoráveis na população e viabilizar, futuramente, a obtenção de cultivares de capim-elefante mais estáveis e efetivamente resistentes à cigarrinha-das-pastagens.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brazil (Finance Code 307956/2023-7) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais-FAPEMIG, Brazil (CAG APQ-02653-23; APQ-03630-23), and Associação para o Fomento à Pesquisa de Melhoramento de Forrageiras—UNIPASTO, Brazil.

REFERÊNCIAS

ACQUAAH, G. **Principles of plant genetics and breeding**. 3. ed. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2020.

AUAD, A. M. *et al.* Biologia e comportamento de *Mahanarva spectabilis* (Distant, 1909) (Hemiptera: Cercopidae) em braquiária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 8, p. 1097-1103, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000800003. Acesso em: 3 jun. 2026.

AUAD, A. M.; FONSECA, M. das G.; RESENDE, T. T. Efeito do aquecimento global sobre pragas das pastagens. In: BETTIOL, W.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; AUAD, A. M.; GHINI, R. (ed.). **Aquecimento global e problemas fitossanitários**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 380-409.

AUAD, A. M. *et al.* Lack of antibiosis against *Mahanarva spectabilis* (Distant) (Hemiptera: Cercopidae) in *Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone germplasm. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, [s. l.], v. 24, n. 4, e505824413, 2024.

BOMMARCO, R. Ecological redesign of crop ecosystems for reliable crop protection: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, [s. l.], v. 44, n. 51, 2024. DOI: 10.1007/s13593-024-00987-z.

CARGNIN, A. **Melhoramento de plantas**: progresso genético e ambiental. [S. l.]: Embrapa, 2007. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/571971. Acesso em: 3 jun. 2026.

EMBRAPA. **Pastagens**. Brasília: Embrapa, 2017. Disponível em: https://www.embrapa.br/portfolio/pastagens. Acesso em: 3 jun. 2026.

ESPITIA BUITRAGO, P. A.; MANZANO, M. R.; HERNÁNDEZ, L. M. Spittlebugs (Hemiptera: Cercopidae): Integrated pest management on gramineous crops in the neotropical ecozone. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, [s. l.], v. 6, p. 891417, 2022. DOI: 10.3389/fsufs.2022.891417.

HALLAUER, A. R.; CARENA, M. J.; MIRANDA FILHO, J. B. **Quantitative genetics in maize breeding**. 3. ed. New York: Springer, 2010.

NEVES, V. F. S. C. *et al.* Identificação de genótipos de capim-elefante resistentes a *Mahanarva spectabilis* (Distant, 1909) (Hemiptera: Cercopidae): primeiro ciclo de seleção recorrente. In: MIRANDA, L. A. et al. (org.). **Pesquisas agronômicas**: aspectos gerais e avanços tecnológicos. Teresina: Wissen, 2025. v. 2, p. 67-74.

PEREZ, G. B. *et al*. **Avaliação da resistência de genótipos de *Pennisetum purpureum* às cigarrinhas-das-pastagens**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1111936/1/05Avaliacaodaresistenciadegenotiposde Pennisetum.pdf. Acesso em: 3 jun. 2026.

RESENDE, T. T. *et al*. Sixteen years of recurrent selection of ruzi grass for resistance to spittlebugs (Hemiptera: Cercopidae). **Agronomy**, [s. l.], v. 14, n. 7, 1516, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/agronomy14071516. Acesso em: 3 jun. 2026.

PARTE V — GENÉTICA, MELHORAMENTO E SELEÇÃO DE GENÓTIPOS

CAPÍTULO 16

EFICIÊNCIA DO USO DE NITROGÊNIO EM PROGÊNIES DE MEIOS-IRMÃOS DE MILHO: PARÂMETROS GENÉTICOS E ANÁLISE MULTIVARIADA PARA SELEÇÃO DE GENÓTIPOS ADAPTADOS AO SEMIÁRIDO

Jacilene Francisca Souza Santos
Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Biodiversidade, Universidade Federal de Sergipe - Brasil

Barbara Nascimento Santos
Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Biodiversidade, Universidade Federal de Sergipe- Brasil

Carla Nayara da Silva Lima
Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Biodiversidade, Universidade Federal de Sergipe- Brasil

Nartênia Susane Costa Aragão
Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Biodiversidade, Universidade Federal de Sergipe- Brasil

Carlos Emanuel Brito dos Santos
Departamento de Engenharia Agronômica do Sertão da Universidade Federal de Sergipe. Nossa Senhora da Glória -SE, Brasil

João Pedro da Silva Alves
Departamento de Engenharia Agronômica do Sertão da Universidade Federal de Sergipe. Nossa Senhora da Glória -SE, Brasil

Camila Lima Santos
Departamento de Engenharia Agronômica do Sertão da Universidade Federal de Sergipe. Nossa Senhora da Glória -SE, Brasil

Tâmara Rebecca Aluquerque de Oliveira
Departamento de Engenharia Agronômica do Sertão, Universidade Federal de Sergipe – Brasil

José Jairo Florentino Cordeiro Junior
Departamento de Engenharia Agronômica do Sertão, Universidade Federal de Sergipe - Brasil

Gustavo Hugo Ferreira de Oliveira
Departamento de Engenharia Agronômica do Sertão, Universidade Federal de Sergipe – Brasil

DOI: 10.52832/wed.221.1313

Resumo: Produzir milho no semiárido sergipano é um desafio diário para o agricultor familiar, a irregularidade das chuvas e a baixa disponibilidade de nitrogênio limitam a produtividade muito antes de qualquer problema de manejo. Nesse contexto, objetivou-se estimar parâmetros genéticos e o potencial de seleção de progênies de meios-irmãos de milho visando à eficiência do uso de nitrogênio em condições semiáridas de Sergipe. O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental da Universidade Federal de Sergipe, situada em Nossa Senhora da Glória-SE, safra 2024. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, em esquema de parcela subdividida com três repetições e 43 progênies de meios-irmãos da população POPTOL2, dois híbridos simples e uma variedade de polinização aberta, sob duas estratégias de adubação nitrogenada, com e sem N em cobertura nas condições edafoclimáticas do sertão sergipano. Foram avaliadas características morfológicas, fisiológicas e pós-colheita. A análise fatorial revelou que os genótipos mais eficientes tenderam a manter componentes de produção satisfatórios mesmo sob restrição nutricional. O índice MGIDI identificou G50CN, G42CN, G4CN, G34CN, G22CN, G2SN e G19SN como os genótipos prioritários para os próximos ciclos de seleção recorrente da POPTOL2, apontando um caminho para o desenvolvimento de materiais adaptados ao semiárido sergipano.

Palavras-chave: *Zea mays* L. Índice MGIDI. Estresse nutricional.

1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é essencial para a segurança alimentar e cadeias de proteína animal, posicionando o Brasil como o terceiro maior produtor mundial, com safra superior a 290 milhões de toneladas (CONAB, 2024). Contudo, esse patamar produtivo demanda elevado uso de fertilizantes nitrogenados, elemento vital em processos bioquímicos e no enchimento de grãos (Congreves *et al.*, 2021). Devido à instabilidade econômica e aos impactos ambientais desse insumo, torna-se estratégico buscar alternativas de manejo e cultivares que otimizem a eficiência de sua utilização.

Essa dependência é crítica no semiárido de Sergipe onde, apesar da expansão do cultivo para suprir a bacia leiteira local (Bispo *et al.*, 2026), o estresse hídrico e a baixa fertilidade natural dos solos limitam severamente a produção. Sob restrição de nitrogênio, as perdas no rendimento de grãos podem ultrapassar 40% (Engida *et al.* 2024), o que torna a Eficiência no Uso de Nitrogênio (EUN) um caráter agronômico e prioritário para garantir a sustentabilidade e a subsistência da agricultura familiar regional. Para mitigar essas limitações, o melhoramento genético via seleção recorrente em populações de polinização aberta destaca-se como uma estratégia viável e de baixo custo, sendo a população POPTOL 2, desenvolvida pelo IAC, um germoplasma promissor por sua expressiva base genética e plasticidade fenotípica (Bernini *et al.*, 2021).

Portanto, o trabalho teve como objetivo estimar parâmetros genéticos e o potencial de seleção de progênies de meios-irmãos de milho visando à eficiência do uso de nitrogênio em condições semiáridas de Sergipe.

2 METODOLOGIA

2.1 Caracterização da área experimental e do material genético

O estudo foi realizado no ano de 2024, na fazenda experimental da Universidade Federal de Sergipe, Campus do Sertão, situada no município de Nossa Senhora da Glória, Sergipe (10°13'06" S, 37°25'13" W; 291 m). De acordo com a classificação climática proposta por Novais e Machado (2023), a região apresenta clima Tropical Quente e Úmido, caracterizado por temperaturas elevadas ao longo do ano e regime pluviométrico relativamente expressivo.

Foram avaliadas 43 progênies de meios-irmãos pertencentes à população POPTOL2 (IAC), juntamente com dois híbridos comerciais (GNZ 7788VIP3 e GNZ 7720VIP3) e uma variedade de polinização aberta (CRUZETA), utilizados como testemunhas. O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados (DBC), com três repetições, sendo cada parcela composta por duas fileiras de 4 m de comprimento, com espaçamento de 0,70 m entre fileiras e 0,20 m entre plantas.

Os tratamentos foram conduzidos sob duas estratégias de adubação nitrogenada: (i) com suplementação nitrogenada (CN), totalizando 200 kg ha^{-1} de N, sendo 40 kg ha^{-1} aplicados na semeadura e 160 kg ha^{-1} em cobertura, parcelada nos estádios V4 e V8; e (ii) sem suplementação nitrogenada na cobertura (SN), no qual foi realizada apenas a aplicação inicial de 40 kg ha^{-1} no momento da semeadura.

2.2 Variáveis analisadas e análise estatística

A caracterização agronômica das progênies de meios-irmãos foi conduzida com base em variáveis fenológicas e de pós-colheita (Tabela 1), selecionadas por sua relevância para programas de melhoramento voltados à eficiência produtiva em condições de semiárido. Esses caracteres refletem tanto o ritmo de desenvolvimento da planta quanto sua capacidade de converter os recursos disponíveis em produção de grãos.

Tabela 1 – Variáveis análises no experimento, Nossa Senhora da Glória -SE, 2024.

Abreviatura	Variável	Unidade
	Características morfológicas	
AP	Altura de planta[1]	m
AE	Altura de espiga[1]	m
	Características fenológicas	
FFD	Florescimento feminino[2]	Dias
FMD	Florescimento masculino[2]	Dias
	Características pós-colheita	

NEP	Número de espigas por parcela[1]	Unidade
NFE	Número de fileiras por espiga[1]	Unidade
NGF	Número de grãos por fileira[1]	Unidade
PE	Peso de espiga[3]	Kg
PG	Produtividade de grãos a 13% de umidade[3]	Kg ha^{-1}

[1]Resultados considerando a média de cinco plantas por parcela; [2]Unidade de expressão considerando dias após o plantio; [3]resultados considerando toda a parcela.
Fonte: Santos *et al.* (2026).

2.3 Análise estatística

Os dados referentes as variáveis analisadas, foram submetidas a análise de variância (ANA VA), para verificar a variabilidade entre os genótipos e doses de nitrogênio analisados. Posteriormente, foi feita análise de parâmetros genéticos e à análise multivariada (Olivoto e Nardino, 2021). Para tanto, utilizou-se o programa software R (R Core Team, 2024).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3. 1 Análise de variância

A análise de variância mostrou efeito significativo do fator Genótipo para todas as variáveis (Tabela 2), com significância a 0,1% para FM, FF, NEP, PE e PG, e a 5% para NGF, confirmando variabilidade genética entre as progênies da POPTOL2 e respaldando a seleção recorrente como estratégia viável.

Tabela 2 – Análise de variância em esquema de parcela subdividida para as variáveis analisadas.

		QM					
FV	GL	FM	FF	NEP	NGF	PE	PG
Nitro	1	206,66	553,05	2062,26	2928,02	106536957	391168665
Bloco	1	0,44	1,96	31,39	577,59	3773492	23795321
Erro a	1	12,01	24,4	208,78	420,02	7589766	4348345
Gen	45	9,929***	12,39***	94,70***	32,00*	901432***	1285444***
Nitro x Gen	45	2,26	4,23	24,62	25,1	309957	354087
Erro b	90	2,81	4,58	17,39	19,05	296715	540229
Total	183						
Média	-	66,2	69,1	13,4	31,8	1980	4518
CV a (%)	-	5,25	3,08	27,83	14,29	27,52	14,60
CV b (%)	-	2,54	3,13	23,39	12,45	26,88	16,39

Nitro: Nitrogênio, Gen: Genótipo, CV: coeficiente de variação, *; ***: significativo a 5% e 0,1% pelo teste F de probabilidade.
Fonte: Santos *et al.* (2026).

A interação Nitrogênio × Genótipo não foi significativa, no ranqueamento dos genótipos nos dois níveis de adubação nitrogenada. Os coeficientes de variação foram adequados ao contexto

experimental, com valores abaixo de 6% para FM e FF e em torno de 15% para PG, dentro do intervalo aceitável para experimentos de milho no semiárido (Gurgel *et al.*, 2013).

Mesmo sob condições de restrição de nitrogênio, a média de produtividade de grãos foi de 4518 ha^{-1}**,** demonstrando o potencial da população POPTOL2 para seleção de genótipos adaptados a ambientes de baixa disponibilidade do nutriente.

3.2 Análise multivariada

3.2.1 Parâmetros genéticos

As estimativas dos parâmetros genéticos revelaram a existência de variabilidade genética expressiva na população avaliada, condição essencial para o sucesso de programas de melhoramento genético (Tabela 3).

Tabela 3 – Estimativas de parâmetros genéticos para caracteres agronômicos e produtivos em progênies de meios-irmãos de milho, safra 2024.

Parâmetros Genéticos	EUN	AP	AE	FM	FF	NEP	NFE	NGF	PE	PG
σ^2g	224,95	0,07	0,04	2,29	4,90	25,81	0,30	20,03	650607	2514700
σ^2r	315,03	0,04	0,03	3,66	5,51	25,70	1,52	22,67	386970	836704
σ^2f	539,97	0,11	0,07	5,96	10,41	51,51	1,81	42,70	1037577	3351405
H^2	0,42	0,64	0,62	0,39	0,47	0,50	0,16	0,47	0,63	0,75
Acurácia	0,83	0,92	0,91	0,81	0,85	0,87	0,61	0,85	0,91	0,95
CVg	30,99	13,63	19,62	2,24	3,24	29,85	3,96	12,90	42,86	39,61
CVr	36,67	10,25	15,39	2,84	3,44	29,78	8,97	13,72	33,05	22,85
CVg/CVr	0,85	1,33	1,27	0,79	0,94	1,00	0,44	0,94	1,30	1,73

σ2g: Variância genética; σ2r :Variância residual; σ2f: Variância fenotípica; H2: herdabilidade no sentido amplo; Acurácia; CVg: Coeficiente de variação genotípica; CVr: Coeficiente de variação residual; CVg/CVr: coeficientes de variação relativa.

Fonte: Santos *et al.* (2026).

A produtividade de grãos (PG) destacou-se com elevada herdabilidade (0,75), acurácia de 0,95 e CVg/CVr (1,73), indicando a predominância da influência do ambiente para essa variável. Esse cenário está alinhando as respostas na seleção de milho tropical sob estresse de nitrogênio obtidas por Engida *et al.* (2024).

De forma análoga, os caracteres estruturais altura de planta (AP) e de espiga (AE) exibiram forte controle genético ($H^2 \geq 0,62$) e acurácias superiores a 0,90, refletindo alta precisão experimental. Em contrapartida, o NFE apresentou baixa herdabilidade (0,16) e reduzido

CVg/CVr (0,44). Esse comportamento mostra que os componentes associados ao desenvolvimento interno da espiga sofrem expressiva interferência ambiental sob restrição de insumos, corroborando com os achados de Jan *et al.* (2025).

A eficiência no uso de nitrogênio (EUN) registrou parâmetros promissores para seleção indireta, combinando herdabilidade moderada (0,42), acurácia de 0,83 e expressivo CVg (30,99%). Embora seu CVg/CVr (0,85) tenha ficado ligeiramente abaixo de 1, a magnitude da variância genética (224,95) confirma o potencial aditivo do germoplasma. A presença dessa variabilidade, associada à herdabilidade do PE (0,63), valida o emprego estratégico de índices multivariados para mitigar efeitos ambientais no semiárido (Olivoto e Nardino, 2021).

3.1.1 Análise de componentes principais e Fatorial

Na análise de componentes principais (Tabela 4) revelou que os dois primeiros componentes (PC1 e PC2) explicaram 78,38% da variância total dos dados, sendo o PC1 responsável por 66,72% da variância permitindo a eficiência na discriminação dos genótipos (Kaiser, 1958). Esse padrão indica que a maior parte da variabilidade entre as progênies pode ser sintetizada em poucas dimensões, facilitando a interpretação dos resultados e a tomada de decisão no processo seletivo (Alves *et al.*, 2021).

Tabela 4- Análise de componentes principais para as variáveis analisadas.

Componentes Principais	Autovalores	Variância Acumulada (%)
PC1	6,67	66,72
PC2	1,17	78,38
PC3	0,66	84,94
PC4	0,58	90,75
PC5	0,49	95,65
PC6	0,23	97,92
PC7	0,08	98,75
PC8	0,05	99,23
PC9	0,05	99,69
PC10	0,03	100

PC: Componentes principais

Fonte: Santos *et al.* (2026).

O primeiro fator (FA1) reuniu os caracteres associados ao ciclo e ao desenvolvimento vegetativo: FF (0,93), PG (0,87), FM (0,83), NGF (0,80), AP (-0,80) e AE (-0,77). A polaridade negativa das alturas indica que progênies com florescimento mais tardio e maior produtividade tenderam a apresentar menor estatura, o que pode ser um atributo agronômico desejável em condições de déficit hídrico e estresse por N. Esse padrão corrobora com os achados de Jan *et al.*

(2025), que identificaram associação entre caracteres de fonte-dreno e EUN em avaliações multivariadas de heterose em milho (Tabela 5).

Tabela 5 – Cargas fatoriais, comunalidades e variância explicada pelos fatores principais (FA1 e FA2) para os caracteres avaliados em progênies de meios-irmãos de milho.

Variáveis	Fatores		Comunalidades
	FA1	FA2	
EUN	-0.14	**0.82**	0.69
AP	**-0.80**	0.50	0.89
AE	**-0.77**	0.50	0.84
FM	**0.83**	-0.16	0.71
FF	**0.93**	-0.10	0.88
NEP	0.23	**-0.84**	0.76
NFE	0.66	-0.25	0.50
NGF	**0.80**	-0.37	0.77
PE	0.59	**-0.76**	0.93
PG	**0.87**	-0.34	0.87
Mean	-	-	0.78

FA1: primeiro fator; FA2: segundo fator. A variância acumulada

Fonte: Santos *et al.* (2026).

O segundo fator (FA2) caracterizou-se por reunir variáveis diretamente relacionadas à produtividade e fisiologia da espiga: EUN (0,82), NEP (-0,84) e PE (-0,76). A carga positiva do EUN no FA2 indica que os genótipos mais eficientes no uso do N tendem a apresentar maior peso de espiga e maior número de espigas, mesmo em condições de restrição nitrogenada. Essa associação é relevante do ponto de vista do melhoramento, pois sugere que a seleção para EUN pode indiretamente beneficiar os componentes de produção (Engida *et al.* 2024).

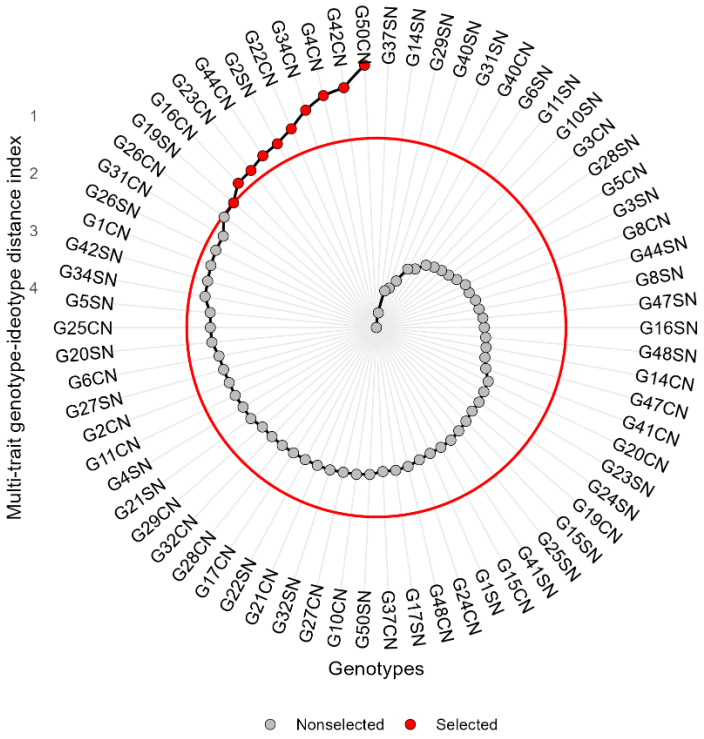
3. 1 Seleção de genótipos para eficiência no uso de nitrogênio

A eficiência no uso do nitrogênio (EUN) expressa a capacidade do genótipo de absorver o N disponível e convertê-lo em produção de grãos e é justamente essa capacidade que varia entre as progênies avaliadas (Moll *et al.*, 1982). Quando a absorção é limitada, seja pela baixa disponibilidade do nutriente aplicado em cobertura, ou pela menor afinidade radicular do genótipo, a produtividade cai de forma desproporcional ao déficit, mostrando que a EUN não depende

apenas da dose aplicada, mas da arquitetura fisiológica de cada material genético (Congreves *et al.*, 2021).

Para identificar os genótipos com melhor desempenho simultâneo em múltiplos caracteres utilizou-se o índice MGIDI (*Multitrait Genotype-Ideotype Distance Index*), que quantifica a distância entre cada genótipo e um ideótipo de referência construído com base nos melhores valores observados para cada variável (Olivoto; Nardino, 2021). As representações gráficas geradas pelo índice permitem visualizar, de forma clara, como cada progênie se posiciona em relação ao perfil ideal, revelando diferenças de comportamento entre os ambientes com e sem nitrogênio e indicando quais materiais reúnem as melhores características para eficiência no uso do N (Figura 1).

Figura 1 – Seleção pelo índice MGIDI para eficiência no uso de nitrogênio em progênies de meios-irmãos da POPOL2 no semiárido sergipano.



Fonte: Santos *et al.* (2026).

Os genótipos G50CN, G42CN, G4CN, G34CN e G22CN destacaram-se pela maior divergência e variabilidade genética associada aos caracteres avaliados, indicando potencial para obtenção de ganhos genéticos. Adicionalmente, G2SN e G19SN merecem destaque por terem sido selecionados sob menor disponibilidade de nitrogênio, sugerindo potencial adaptação à restrição nutricional, característica estratégica para programas de melhoramento voltados à eficiência do uso de nitrogênio em condições semiáridas (Yue *et al.*, 2022; Aragão *et al.*, 2025).

4 CONCLUSÃO

A população POPTOL2 apresenta variabilidade genética a ser explorável, com destaque para produtividade de grãos, confirmando a seleção recorrente como estratégia viável para o avanço do programa de melhoramento.

Os genótipos G50CN, G42CN, G4CN, G34CN, G22CN, G2SN e G19SN, identificados pelo índice MGIDI, constituem os candidatos prioritários para os próximos ciclos de seleção recorrente da POPTOL2 visando eficiência no uso do nitrogênio no sertão sergipano.

Agradecimentos e financiamento

Agradecimentos à Universidade Federal de Sergipe (UFS), ao Grupo de Estudos em Melhoramento Vegetal do Semiárido (GEMS), ao Programa de Pós-graduação em Agricultura e Biodiversidade (PPGAGRI) e ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de financiamento 001.

REFERÊNCIAS

ALVES, M. P, MINUZZI, R. B.; CARON, M. L. Identificação de estiagens e estimativas de produtividade de milho para o município de Campos Novos, Santa Catarina. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.28, p.101-117, 2021.

ARAGÃO, N. S. C.; SANTOS, B. N.; BARRETO, M. S. R., SANTOS, H. R. A.; CORDEIRO, J. J. F.; OLIVEIRA, G. H. F. D. Selection of maize genotype using multi-trait index and ideotype design for semi-arid regions. Crop Breeding and Applied Biotechnology, v. 25, n. 3, p. e51262532, 2025.

BERNINI, C. S.; GUIMARÃES, P. S.; GALLO, P. B.; PATERNIANI, M. E. A. G. Z. Parâmetros genéticos de progênies interpopulacionais de milho para caracteres relacionados com tolerância à seca. **Scientific Electronic Archives**, v. 14, n. 9, p. 25-31, 2021.

BISPO. P. C. F.; SANTOS. B. N.; SANTOS. J. F. S.; ARAGÃO. N. S. C.; FEITOSA. D. A. S.; FERREIRA. K. P. F.; OLIVEIRA, T. R. A.; CORDEIRO JUNIOR, J. J. F.; de OLIVEIRA. G. H. F. Phenotypic characterization of elite maize genotypes under semi-arid conditions of Sergipe. Brazil. **Scientia Plena**. v.22. p. 030201, 2026.

CONAB – **Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2023/2024**. Brasília: CONAB, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 10 maio 2026.

CONGREVES, K. A. OTCHERE, O.; FERLAND, D.; FARZADFAR, S.; WILLIAMS, S.; ARCAND, M. M. Nitrogen use efficiency definitions of today and tomorrow. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 637108, 2021.

ENGIDA, B. T.; TAREKEGNE, A.; WEGARY, D.; VAN BILJON, A.; LABUSCHAGNE, M. T. Genotype× environment interaction and grain yield stability of quality protein maize hybrids

under stress and non-stress environments. **Cogent Food & Agriculture**, v. 10, n. 1, p. 2324537, 2024.

JAN, M. F.; LI, M.; LIU, C.; LIAQAT, W.; ALTAF, M. T.; BARUTÇULAR, C.; BALOCH, F. S. Multivariate analysis of root architecture, morpho-physiological, and biochemical traits reveals higher nitrogen use efficiency heterosis in maize hybrids during early vegetative growth. **Plants**, v. 14, n. 3, p. 399, 2025.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, v.23, n.3, p. 187-200, 1958.

MOLL, R.H.; KAMPRATH, E.J.; JACKSON, W.A. Analysis and interpretation of factors which contribute to eficiency of nitrogen utilization. Agronomy Journal, v. 74. p. 562-564, 1982.

NOVAIS, G. T.; MACHADO, L. A. Os climas do Brasil: segundo a classificação climática de Novais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.32, p.1-39, 2023.

OLIVOTO, T.; NARDINO, M. MGIDI: Toward an effective multivariate selection in biological experiments. **Bioinformatic**s, v.37, p.1383-1389, 2021.

R CORE TEAM (2024). _R: **A Language and Environment for Statistical Computing**. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acessado em 21 de maio de 2026.

YUE, H.; OLIVOTO, T.; BU, J.; LI, J.; WEI, J.; XIE, J.; CHEN, S.; PENG, H.; NARDINO, M.; JIANG, X. Multi-trait selection for mean performance and stability of maize hybrids in mega-environments delineated using envirotyping techniques. **Front Plant Sci**, v. 13, p. 1030521. 2022.

CAPÍTULO 17

ANÁLISE MULTIVARIADA PARA SELEÇÃO DE PROGÊNIES DE MEIOS-IRMÃOS DE MILHO EM CONDIÇÕES CONTRASTANTES DE DISPONIBILIDADE DE NITROGÊNIO EM REGIÃO SEMIÁRIDA

Nartênia Susane Costa Aragão
Programa de Pós-graduação em Agricultura e Biodiversidade, Universidade Federal de Sergipe – Brasil

Mikaely Rosendo dos Santos
Departamento de Engenharia Agronômica do Sertão da Universidade Federal de Sergipe – Brasil

Barbara Nascimento Santos
Programa de Pós-graduação em Agricultura e Biodiversidade, Universidade Federal de Sergipe- Brasil

Carla Nayara da Silva Lima
Programa de Pós-graduação em Agricultura e Biodiversidade, Universidade Federal de Sergipe- Brasil

Jacilene Francisca Souza Santos
Programa de Pós-graduação em Agricultura e Biodiversidade, Universidade Federal de Sergipe- Brasil

Raiane Prissila Andrade da Paixão
Departamento de Engenharia Agronômica do Sertão da Universidade Federal de Sergipe – Brasil

Carlos Emanuel Brito dos Santos
Departamento de Engenharia Agronômica do Sertão da Universidade Federal de Sergipe – Brasil

Tâmara Rebecca Albuquerque de Oliveira
Departamento de Engenharia Agronômica do Sertão da Universidade Federal de Sergipe – Brasil

José Jairo Florentino Cordeiro Junior
Departamento de Engenharia Agronômica do Sertão da Universidade Federal de Sergipe – Brasil

Gustavo Hugo Ferreira de Oliveira
Departamento de Engenharia Agronômica do Sertão da Universidade Federal de Sergipe – Brasil

DOI: 10.52832/wed.221.1314

Resumo: O milho (*Zea mays* L.) é uma das principais culturas agrícolas do mundo, sendo amplamente cultivado devido à sua importância econômica e à elevada variabilidade genética, que possibilita a obtenção de genótipos adaptados a diferentes condições ambientais. Nesse contexto, a utilização de metodologias que aumentem a eficiência da seleção é fundamental para o avanço dos programas de melhoramento genético. Selecionar genótipos de meios-irmãos de milho submetidas a diferentes níveis de nitrogênio, utilizando valores genotípicos preditos por BLUP e o índice Multi-Trait Stability Index (MTSI) para região semiárida. Os experimentos foram conduzidos em duas áreas experimentais, localizadas nos municípios de Nossa Senhora da Glória e Graccho Cardoso, Sergipe, durante o ano de 2024. Foram avaliados 27 genótipos de milho, em delineamento de blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas, com três repetições. Foram analisadas características morfológicas e produtivas, sendo os dados submetidos à predição de valores genotípicos via REML/BLUP e à seleção multicaracterística por meio do índice MTSI. Os genótipos G27, G3 e G17 apresentaram os maiores valores genotípicos para produtividade de grãos. O índice MTSI selecionou os genótipos G13, G14, G19, G21, G24, G26, G5 e G7 como os mais próximos do ideótipo estabelecido. A integração entre BLUP e MTSI mostrou-se eficiente na identificação de genótipos superiores, destacando G14, G21 e G26 como os materiais mais promissores para continuidade no programa de melhoramento

Palavras-chave: Estabilidade. Melhoramento genético. Modelos mistos. *Zea mays* L.

1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas agrícolas de maior importância econômica e social no mundo, sendo amplamente utilizado na alimentação humana e animal, além de servir como matéria-prima para diversos setores industriais. Sua ampla adaptação a diferentes condições ambientais é resultado da elevada variabilidade genética da espécie, característica que tem permitido o desenvolvimento de cultivares adaptadas a distintos sistemas de produção e condições edafoclimáticas (Santos *et al.*, 2025).

Apesar de apresentar metabolismo fotossintético do tipo C_4, a produtividade do milho é fortemente influenciada pela disponibilidade de água e nutrientes no solo. Dentre os nutrientes essenciais, o nitrogênio (N) destaca-se por desempenhar papel fundamental nos processos metabólicos da planta, participando da síntese de proteínas, aminoácidos, enzimas e clorofila. Entretanto, a baixa eficiência de aproveitamento do nitrogênio aplicado e a ocorrência de estresses abióticos, especialmente o déficit hídrico, constituem fatores limitantes para a expressão do potencial produtivo da cultura (Ortez *et al.*, 2022).

A adubação nitrogenada é uma das práticas de manejo mais importantes para a obtenção de elevados rendimentos de grãos. Contudo, parte significativa do nitrogênio aplicado pode ser perdida por volatilização, lixiviação e desnitrificação, reduzindo a eficiência de uso do nutriente pelas plantas e aumentando os custos de produção e os impactos ambientais (Modesto *et al.*, 2017). Nesse contexto, o desenvolvimento de genótipos mais eficientes no uso do nitrogênio e adaptados a ambientes com restrição hídrica representa uma estratégia promissora para aumentar a sustentabilidade dos sistemas produtivos.

O sucesso dos programas de melhoramento genético depende da identificação de genótipos superiores com base em múltiplas características de interesse. Para isso, metodologias estatísticas modernas têm sido amplamente empregadas, destacando-se os modelos mistos via REML/BLUP (Restricted Maximum Likelihood/Best Linear Unbiased Prediction), que permitem estimar com maior precisão os valores genotípicos dos indivíduos, minimizando a influência dos efeitos ambientais e aumentando a eficiência da seleção (Olivoto *et al.*, 2017). Além disso, a utilização de índices multicaracterísticos, como o Multi-Trait Stability Index (MTSI), possibilita a seleção simultânea de genótipos com elevado desempenho, estabilidade e adaptação, considerando múltiplos caracteres agronômicos em uma única estatística (Olivoto *et al.*, 2021).

Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo selecionar genótipos de meios-irmãos de milho submetidas a diferentes níveis de nitrogênio, utilizando valores genotípicos preditos por BLUP e o índice Multi-Trait Stability Index (MTSI) para região semiárida.

2 METODOLOGIA

As áreas experimentais localizadas em Nossa Senhora da Glória e Graccho Cardoso apresentam clima classificado como tr**neb, conforme a classificação proposta por Novais e Machado (2023), e solos enquadrados na classe dos Argissolos.

Os experimentos foram conduzidos em ambos os municípios utilizando delineamento em blocos casualizados (DBC), em esquema de parcelas subdivididas, composto por 27 genótipos e dois níveis de nitrogênio, com três repetições. Foram avaliadas 26 progênies de meios-irmãos, além de uma testemunha, sob duas condições de disponibilidade de nitrogênio: ausência de adubação nitrogenada em cobertura e aplicação de 140 kg ha^{-1} de nitrogênio.

A adubação de plantio foi realizada de acordo com as recomendações técnicas para a cultura do milho. Em Nossa Senhora da Glória foram aplicados 181,8 kg ha^{-1} de MAP, 30 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 100 kg ha^{-1} de KCl. Em Graccho Cardoso, as doses corresponderam a 181,8 kg ha^{-1} de MAP, 141 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 133 kg ha^{-1} de KCl. Em ambos os ambientes, também foram fornecidos 20 kg ha^{-1} de nitrogênio na semeadura.

Os tratamentos de nitrogênio constituíram as parcelas principais. O tratamento de alto nitrogênio consistiu na aplicação de 140 kg ha^{-1} de N em cobertura, distribuídos em duas aplicações, sendo 60% da dose no primeiro parcelamento e 40% no segundo. O tratamento de baixo nitrogênio não recebeu adubação nitrogenada em cobertura. As progênies de meios-irmãos compuseram as subparcelas experimentais.

Cada subparcela foi formada por duas fileiras de 3 m de comprimento, espaçadas em 0,70 m entre linhas e 0,20 m entre plantas. Cada unidade experimental continha aproximadamente 30 plantas, correspondendo a uma densidade populacional estimada de 71.425 plantas ha^{-1}.

Conforme a Tabela 1, as avaliações agronômicas contemplaram características morfológicos e produtivos.

Tabela 1 - Características agronômicas avaliadas em genótipos de milho (*Zea mays* L.) cultivados em campo sob condições de campo, em Nossa Senhora da Glória e Graccho Cardoso - SE, na safra 2024.

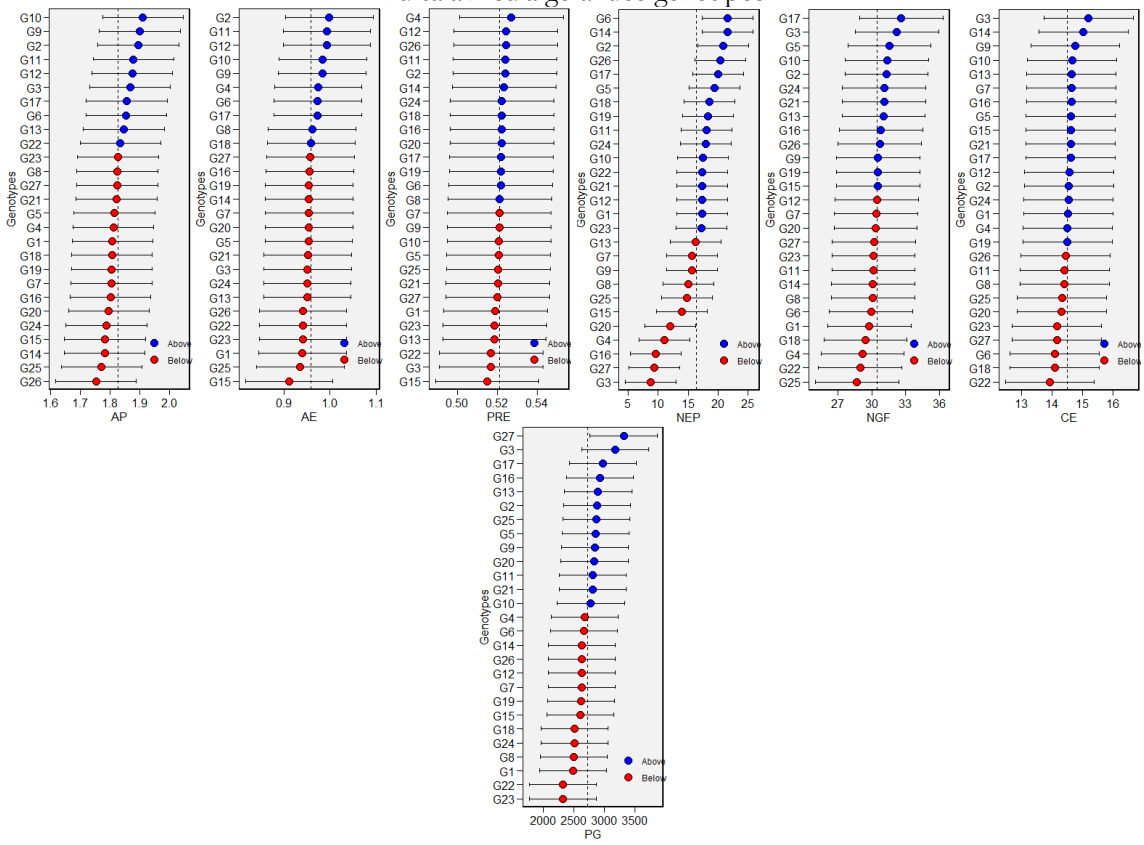
Variável	Sigla	Unidade	Forma de avaliação
			Morfológica
Altura de planta	AP	m	Média de cinco plantas aleatórias da parcela, medida do nível do solo até a inserção da folha bandeira
Altura de espiga	AE	m	Média de cinco plantas aleatórias, aferida do nível do solo até a inserção da primeira espiga
Posição relativa da espiga	PRE	m	Relação entre a altura da espiga e altura da planta
			Pós-colheita
Número de espigas por parcela	NEP	unid.	Média de cinco espigas aleatórias da parcela
Número de grãos por fileiras	NGF	unid.	Média de cinco espigas aleatórias da parcela
Comprimento de espiga	CE	unid.	Média de cinco espigas aleatórias da parcela
Produtividade de grãos	PG	kg ha^{-1}	Calculada pela equação PG = $PGTS/ST*QP$, de acordo com Zuber (1942)

Fonte: Autores, 2026.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1, os valores genotípicos preditos pelos BLUPs evidenciaram a existência de variabilidade genética entre os genótipos avaliados para todas as características agronômicas estudadas, indicando a existência de diferenças genéticas passíveis de exploração pelo programa de melhoramento. A ocorrência de genótipos com desempenho superior à média geral demonstra o potencial para obtenção de ganhos genéticos por meio da seleção. Segundo Olivoto *et al.* (2017), a metodologia REML/BLUP proporciona estimativas mais acuradas dos valores genéticos, permitindo maior eficiência na identificação de indivíduos superiores.

Figura 1 – Valores genotípicos preditos (BLUPs) para altura de planta (AP), altura de espiga (AE), posição relativa da espiga (PRE), número de espigas por planta (NEP), número de grãos por fileira (NGF), comprimento de espiga (CE) e produtividade (PG) em progênies de milho avaliadas. As linhas horizontais representam os intervalos de confiança dos valores genotípicos preditos e a linha tracejada indica a média geral dos genótipos.



Fonte: Aragão, 2026.

Para altura de planta (AP), os genótipos G10, G9, G2, G11, G12 e G3 apresentaram os maiores valores genotípicos, posicionando-se acima da média da população. Em relação a altura de espiga (AE), destacaram-se os genótipos G2, G11, G12, G10 e G9, enquanto para a posição relativa da espiga (PRE), os genótipos G4, G12, G26, G11 e G2 desempenho superior. Segundo (Hallauer; Carena; Miranda-Filho, 2010), valores excessivamente elevados dessas características podem aumentar o risco de acamamento e dificultar a colheita mecanizada.

Para o número de espigas por planta (NEP), destacaram-se G6, G14, G2, G26 e G17, enquanto para número de grãos por fileira (NGF) os maiores valores foram observados em G17, G3, G5, G10 e G2. Essas características constituem importantes componentes do rendimento e apresentam elevada importância em programas de seleção voltados ao incremento da produtividade (Hallauer, Carena e Miranda-Filho, 2010).

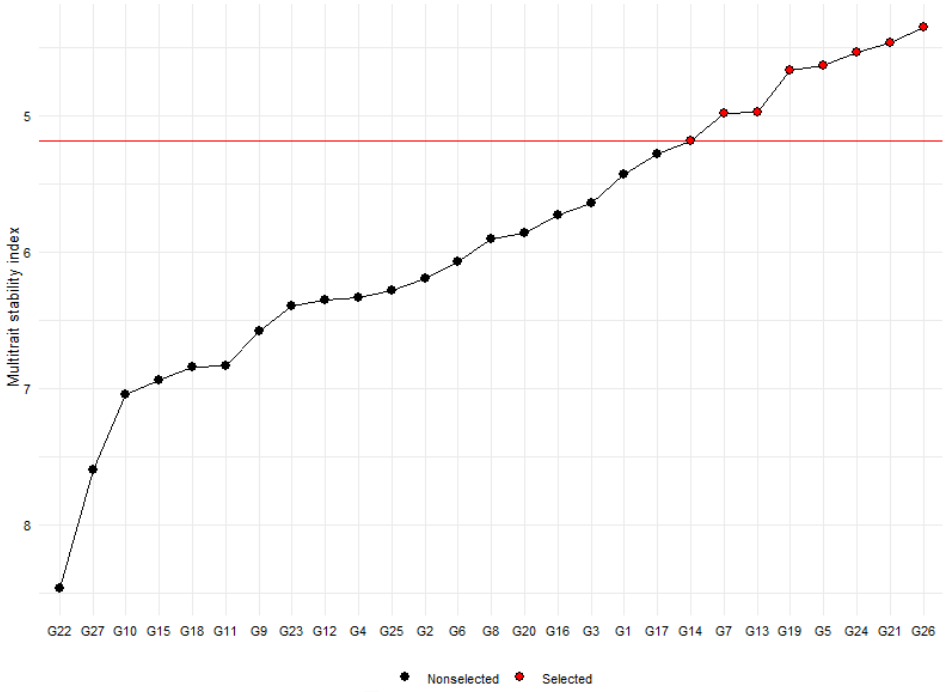
No comprimento de espiga (CE), os genótipos G3, G14, G9, G10 e G13 apresentaram os maiores valores genotípicos. Para produtividade de grãos (PG), os genótipos G27, G3 e G17 apresentaram os maiores valores de BLUP. O destaque de G27 sugere elevado potencial produtivo,

posicionando-o como um dos principais materiais para recomendação e utilização em futuros cruzamentos. Esse resultado é particularmente relevante por se tratar da característica de maior interesse econômico na cultura do milho.

Baretta *et al.* (2017) e Dudek *et al.* (2020) que observaram elevada eficiência da metodologia REML/BLUP na discriminação de genótipos superiores de milho, permitindo identificar materiais com maior potencial para utilização em programas de melhoramento. Além disso, estudos conduzidos por Kunwar *et al.* (2024) demonstraram que a utilização de BLUPs em ensaios multiambientais possibilita a identificação de híbridos simultaneamente produtivos e estáveis, aumentando a confiabilidade das recomendações de seleção.

Na Figura 2, considerando uma intensidade de seleção de 30%, a aplicação do índice Multi-Trait Stability Index (MTSI) resultou na seleção dos genótipos G13, G14, G19, G21, G24, G26, G5 e G7 como os mais próximos do ideótipo previamente estabelecido. O MTSI foi desenvolvido para integrar desempenho médio, estabilidade e múltiplas características agronômicas em uma única métrica de seleção, permitindo maior eficiência na identificação de genótipos superiores (Olivoto *et al.*, 2021). Segundo os autores, essa abordagem reduz as limitações dos métodos tradicionais de seleção, que frequentemente consideram apenas o desempenho médio dos genótipos.

Figura 2 – Seleção dos genótipos pelo índice Multi-Trait Stability Index (MTSI)



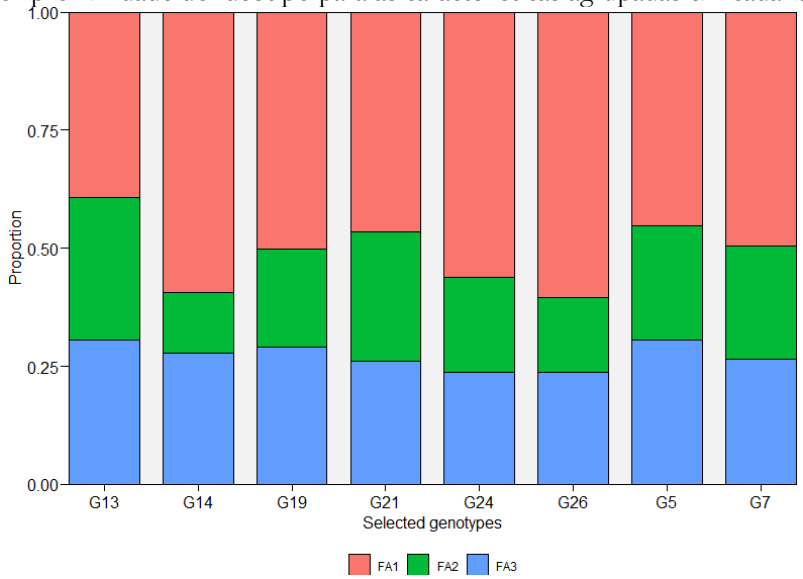
Fonte: Aragão, 2026.

Resultados semelhantes foram observados por Behera *et al.* (2024), que verificaram ganhos simultâneos para produtividade, estabilidade e adaptação. Abdelghany *et al.* (2021) também relataram elevada eficiência do índice na identificação de genótipos superiores em diferentes

condições de cultivo. Esses estudos demonstram a ampla aplicabilidade do MTSI para programas de melhoramento conduzidos em ambientes contrastantes.

A eficiência do MTSI na identificação dos genótipos superiores pode ser melhor compreendida por meio da análise da contribuição dos fatores para a distância ao ideótipo (Figura 3). Essa abordagem permite identificar quais grupos de características contribuíram positiva ou negativamente para o desempenho dos genótipos selecionados, fornecendo informações estratégicas para a tomada de decisão no programa de melhoramento (Olivoto *et al.*, 2021).

Figura 3 – Contribuição percentual dos fatores (FA1, FA2 e FA3) para a distância ao ideótipo dos genótipos selecionados pelo índice Multi-Trait Stability Index (MTSI). Menores contribuições indicam maior proximidade do ideótipo para as características agrupadas em cada fator.



Fonte: Aragão, 2026.

Observou-se que os genótipos selecionados apresentaram diferentes padrões de contribuição dos fatores FA1, FA2 e FA3, evidenciando que a superioridade observada não foi resultado de um único conjunto de características, mas da combinação entre diferentes atributos agronômicos. De modo geral, menores contribuições de determinado fator indicam maior proximidade do genótipo ao ideótipo para as características agrupadas nesse fator, enquanto contribuições mais elevadas sugerem características que ainda podem ser aprimoradas em ciclos futuros de seleção (Olivoto *et al.*, 2021).

Os resultados obtidos demonstram que os genótipos G13, G14, G19, G21, G24, G26, G5 e G7 reúnem características favoráveis para continuidade no programa de melhoramento. Dentre eles, G14, G21 e G26 destacam-se por apresentarem maior equilíbrio entre desempenho agronômico, produtividade e estabilidade, enquanto G13, G19, G5 e G7 evidenciam elevado potencial para obtenção de ganhos produtivos. Resultados semelhantes foram relatados por Subramani *et al.* (2024), que utilizaram o MTSI para selecionar híbridos de milho forrageiro

superiores e estáveis em múltiplos ambientes, confirmando a eficiência dessa metodologia na identificação de materiais promissores para programas de melhoramento.

4 CONCLUSÃO

A análise conjunta dos BLUPs e do índice Multi-Trait Stability Index (MTSI) indicam que G13, G14, G19, G21, G26, G5 e G7 constituem o grupo de maior potencial para avanço no programa de melhoramento. Dentre eles, G14, G21 e G26 destacam-se pela maior estabilidade e adaptação ampla, enquanto G13, G19, G5 e G7 apresentam maior potencial para ganhos produtivos, sendo recomendados para etapas posteriores de avaliação e seleção.

Agradecimentos e financiamento

À Universidade Federal de Sergipe (UFS), ao Grupo de Estudos em Melhoramento Vegetal do Semiárido (GEMS), ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Biodiversidade (PPGAGRI) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

ABDELGHANY, Ahmed M. *et al.* Exploring the phenotypic stability of soybean seed compositions using multi-trait stability index approach. **Agronomy**, v. 11, n. 11, p. 2200, 2021.

BARRETA, D. *et al.* Estimates of genetic parameters and genotypic values prediction in maize landrace populations by REML/BLUP procedure. **Genet Mol Res**, v. 16, n. 2, p. 24, 2017.

BEHERA, Partha Pratim *et al.* Genetic gains in forage sorghum for adaptive traits for non-conventional area through multi-trait-based stability selection methods. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1248663, 2024.

DUDEK, Giandrei *et al.* Estimativa de parâmetros genéticos e ganho com seleção em acessos de milho crioulo Estimation of genetic parameters and gain with selection in accessions of maize landraces. **Braz. J. of Develop**, v. 6, n. 10, p. 82741-82755, 2020.

HALLAUER, Arnel R.; CARENA, Marcelo J.; MIRANDA FILHO, JB de. Quantitative genetics in maize breeding. **Springer Science & Business Media**, 2010.

KUNWAR, Chitra Bahadur *et al.* Multi-model approach for optimizing cold-wave resilient maize selection: unveiling genotype-by-environment interaction and predicting yield stability. **CABI Agriculture and Bioscience**, v. 5, n. 1, p. 63, 2024.

MODESTO, V.C.; SOUZA, H.D.; CAVALCANTE, A.C.R.; SALLES, H.O.; LIMA, A. R.; DIAS, C.T.S.; NATALE, W. Nitrogen fertilization regarding maize crop in a semi-arid region. **Científica**, v. 45, n. 4, p. 443-452, 2017.

NOVAIS, Giuliano Tostes; MACHADO, Lilian Aline. Os climas do Brasil: segundo a classificação climática de Novais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 32, p. 1-39, 2023.

OLIVOTO, Tiago *et al.* REML/BLUP and sequential path analysis in estimating genotypic values and interrelationships among simple maize grain yield-related traits. **Genetics and Molecular Research**, v. 16, n. 1, p. 1-19, 2017.

OLIVOTO, Tiago *et al.* Multi-trait selection for mean performance and stability in maize. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 5, p. 3968-3974, 2021.

ORTEZ, Osler A. *et al.* Abnormal ear development in corn: A review. **Agronomy Journal**, v. 114, n. 2, p. 1168-1183, 2022.

SANTOS, Alisson *et al.* Estabilidade Produtiva de Genótipos de Milho no Alto Sertão Sergipano. **Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, v. 11, n. 1, p. e1101201-e1101201, 2025.

SUBRAMANI, Palaniyappan *et al.* Selection of superior and stable fodder maize hybrids using MGIDI and MTSI indices. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 24, n. 4, p. e498624418, 2024.

ZUBER, M. S. Relative Efficiency of Incomplete Block Designs Using Corn Uniformity Trial Data 1. **Agronomy Journal**, v. 34, n. 1, p. 30-47, 1942.

PARTE VI — GEOTECNOLOGIAS, MAPEAMENTO E AGRICULTURA DE PRECISÃO

CAPÍTULO 18

PROJETO DE OBSERVAÇÕES GEODÉSICAS: MAPA DA ÁREA DE FERTILIDADE

Germano Oliveira Silvestre
Estudante de graduação, agronomia (UFSM), orientado por Doutor Sandro Barreto Fensterseifer.
Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul, Brasil

Ramiro Tres Lamego e Silva
Estudante de graduação, agronomia (UFSM), orientado por Doutor Sandro Barreto Fensterseifer.
Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul, Brasil

DOI: 10.52832/wed.221.1315



Resumo: O trabalho aborda a aplicação da agricultura de precisão em uma área de 44,162 ha no município de Pinhal-RS, com foco na análise da fertilidade do solo e na definição da adubação recomendada. Utilizou-se o software ArcMap/ArcGis, que permitiu a interpolação de dados, geração de mapas temáticos (geomorfologia, hidrologia, solos, altimetria, declividade, fertilidade e adubação) e identificação das demandas específicas por nutrientes de cada gleba. A agricultura de precisão, fundamentada em tecnologias de informação (TI) como GPS, SIG, sensores eletrônicos e dispositivos móveis, visa otimizar o uso de insumos, reduzir impactos ambientais e aumentar a eficiência produtiva. O estudo comparou custos entre o manejo convencional e o manejo com taxa variável. Os resultados mostraram que, devido ao excesso de dejetos suínos historicamente aplicados na área, ocorreu homogeneização da fertilidade, reduzindo a variabilidade espacial detectável. Isso tornou a aplicação em taxa variável ineficiente e mais cara, elevando os custos de P e K em comparação ao método convencional. O manejo tradicional mostrou-se mais econômico para este caso específico. Conclui-se que o uso da AP deve ser avaliado caso a caso, considerando o histórico de manejo, a variabilidade real do solo e as condições da área. O ArcMap demonstrou ser uma ferramenta eficaz para análise espacial, embora complexa para usuários iniciantes, e possibilitou alcançar os objetivos do estudo.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Fertilidade de solo. Sustentabilidade. Eficiência agrícola.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a agricultura de precisão vem ganhando força, pois cada vez mais busca-se maximizar a eficiência dos insumos agrícolas, por meio de aplicação mais precisas e baseadas nas tecnologias de informações. Com isso nas aulas de ajustamento deste corrente semestre foi feita a análise de uma área de 44,162 ha no município de Pinhal-RS, visando fazer a análise precisa da fertilidade do solo dessa área.

Para o corrente andamento da disciplina foi usado o software ArcGis, que possibilitou a criação de diversos mapas através da interpolação dos dados prévios da área. Com a criação desses mapas foi possível se ter um maior conhecimento sobre as glebas das áreas e suas reais demandas por nutrientes.

Por fim, foi possível analisar os teores de nutrientes NPK da área e fazer uma interpretação mais precisa sobre a quantidade de adubação a ser aplicada em Kg/há.

2 MATERIAL E MÉTODOS

5.1. DELIMITAÇÃO DA ÁREA

Foi delimitada uma área no município de Jacutinga no Google Earth, de cerca de 2665,5 hectares.

5.2. IMPORTAÇÃO DA MASCÁRA DA ÁREA DO PROJETO

Inicialmente o Arctoolbox deve ser habilitado na página inicial no ArcMap, após isso a opção "Conversion tools" do "Arctoolbox" deve ser selecionada e dentro dela a opção "From KM" deve ser selecionada e dentro dela a "KML to layer" deve ser escolhida. Após isso deve abrir uma aba do "KML to layer" e na opção "Input" deve ser selecionado o arquivo com a área delimitada

escolhida e clicar em "OK". Resumindo "Arctoolbox"->"Conversion tools"-> "From KML"-> "KML to layer"-> Vai abrir uma nova página para inserir o arquivo dos limites dos municípios na opção "input"-> "OK". Após isso ir nas propriedades do arquivo aberto no ArcMap e na opção "Symbology" deixar sem coloração de preenchimento e deixar as linhas dos limites mais destacadas. Feito isso, deve-se ir no ícone "Add Date" e adicionar o arquivo "mosaico", o qual está dentro da pasta SRTM RS TUDO, adicionando os dados de altimetria que geraram o mapa das curvas de níveis.

5.3Extração Da Área Do Projeto

No "Arctoolbox" ir na opção "Spatial Analyst Tools"-> "Extraction"-> "Extract By Mask"-> vai abrir uma aba na seleção "Input raster" colocar o arquivo "mosaic" e no "Imput" colocar o arquivo "polygons" e clicar em "OK". Após isso vai ser gerado um mapa da altimetria da área delimitada. Deve-se ir nas propriedades do arquivo gerado e altera-se o nome altimetria, e também em simbologia altera-se o nuance das cores para melhor destaque das características da área.

5.4 Elaboração Do Plano De Informação De Declividade

No arctoolbox ir na opção Spatial Analyst Tools-> Surface-> Slope na janela aberta em "Input raster" selecionou-se o Layer "Altimetria".No Layer criado, clicou-se com o botão direito e selecionou-se "Properties". Na aba "general" foi renomeado para "Declividade", e em "Symbology", em "Label", alterou-se os valores para apenas duas casas após a vírgula, e alterou-se os valores finais para que duas classes não se repetissem.

5.5 Determinação da resolução espacial da área do projeto

Para altimetria de baixa resolução ir no arctoolbox ir na opção "Data Manager Tools"-> "Projections and Transformation"-> "Raster"-> "Project Raster", na opção "input raster" colocar o arquivo "altimetria", no "output Raster": "Coordinate Systems" > "UTM"-> 11 "WGS 1984"-> "South Hemisphere"-> "Fuso 22 S". Após isso ir nas propriedades da camada criada e renomear para altimetria 2 e ir nas propriedades na aba Source em cell size e ver a resolução da camada.

5.6 Rotina de integração para retificação da resolução espacial

Para criar camada de altimetria de alta resolução deve-se diminuir o tamanho do pixel e aumentar a resolução espacial. Deve-se ir no arctoolbox na opção Conversion tools-> From raster-> Raster to point->input raster=altimetria de baixa resolução-> Field= value-. clicar em OK. Vai

gerar uma nova camada, abrir a atribute table. Após isso deve se ir no "Arctoolbox" em "Spatial analyst tools"-> "Interpolation"-> "Spline", vai abrir uma nova aba na "Input point features" deve se adicionar "Pontos amostrais", em" Z value field" se altera para "Grid code" e em " Output cell size" colocar 3 metros, gerando o mapa de altimetria de alta resolução.Em seguida,deve-se recortar a área de interesse do mapa indo no "Arctoolbox" em "Spatial analyst tools"-> "Extraction"-> "Extraction by mask" e na aba que abrir no "Input raster" adicionar o arquivo com os limites do projeto.

5.7 Gerar o mapa de declividade de alta resolução

Ir no "Arctoolbox" em "Spatial analyst tools" em "Surface"-> "Slope", irá abrir uma nova aba colocar em "Input raster" o arquivo "Altimetria de alta resolução" e em "Output measurement" selecionar "Percent-rise", após clicar em "OK". Vai ser gerada uma nova camada, deve se ir nas suas "Properties" em "Label" e alterar os valores deixando apenas duas casas decimais após a vírgula e não deixar que ocorra a repetição de números entre as classes de declividade. E nas "Properties" na aba "General" altera- se o nome para declividade" .

5.8. Recálculo da resolução radiométrica

Para facilitar o processamento dos arquivos diminuir o tamanho dos arquivos indo no "Arctoolbox" ir na opção "Data Manager Tools"-> "Raster"-> "Raster dataset"-> "Copy raster"-> em "Input raster" colocar o arquivo "Altimetria de alta resolução" e em "Pixel type" selecionar "16_BIT_SIGNED"-> clicar em "OK".

5.9 Gerar mapa de curvas de nível

Deve ir no "Arctoolbox" em "Spatial analyst tools" em "Surface"-> "Contour", irá abrir aba em "Input raster" colocar "Altimétria de alta resolução" e em " Contour interval" colocar o valor que mais se adequa à área escolhida, no meu caso foi 8 e clicar "OK". Depois ir nas propriedades da camada gerada em "Symbology"-> "Categories"-> "Unique values"-> "Value field"-> selecionar a opção "Contour" e clicar em "Add all values" e em "OK". Para concluir essa etapa deve-se identificar e destacar as curvas mestras indo em "Properties"-> "Symbology"-> e mudar a coloração e a espessura das linhas conforme o necessário.

5.10 Adicionar mapadesolo

Ir no ícone "Add date" e adicionar o arquivo "Brasil brasil_solos_5m_20201104".Vai ser aberto um layer de "Brasil_solos", nessa etapa devemos trazer a camada dos "Limites" para cima

do layer do “Brasil_solos”. Feito isso, se deve recortar o arquivo vetorial de dados de solo do Brasil, usando a ferramenta “Clip”. Deve-se ir em “Geoprocessing”-> em “Clip”, na aba que abrir em “Input features” colocar o arquivo “Brasil Solos” e em “Clip features” colocar “Limites”. Após isso ir na camada criada e ir em suas “Properties” e na aba “General” e alterar o nome para Solos, após isso ir na aba “Symbology”->”Categories”-> em “Value Field” colocar “LEG-DESC” e-> e clicar em “Add all values” e clicar em “Aplicar” e “OK”.

5.11 Adicionar mapa de hidrografia

Ir no ícone “Add date” e adicionar o arquivo “Hidrografia-> “Trecho de drenagem " e “Add ". Feito isso, se deve recortar o arquivo vetorial de dados, usando a ferramenta “Clip”. Deve-se ir em “Geoprocessing”-> em “Clip”, na aba que abrir em “Input features” colocar o arquivo “Trecho de drenagem” e em “Clip features” colocar “Limites”.Após isso renomear a cama gerada para “Rede de drenagem” e apagar a primeira camada de drenagem.Em seguida ir em ir na camada criada e ir em suas “Properties” ir na aba “Symbology”->”Categories”-> em “Value Field” selecionar “nomeabrev” clicar em “Aplicar” e “OK”.

5.12 Adicionar mapa de hidrogeologia

Ir no ícone “Add date” e selecionar o arquivo “Geomorfologia” e selecionar “ Mapa hidrogeológico” e selecionar “hidrogeologia.shp” após isso clicar em “Add”Feito isso, se deve recortar o arquivo vetorial de dados, usando a ferramenta “Clip”. Deve-se ir em “Geoprocessing”-> em “Clip”, na aba que abrir em “Input features” colocar o arquivo “Hidrogeologia_BR” e em “Clip features” colocar “Limites”. Após isso renomear a camada gerada para “Geomorfologia”.Em seguida ir em ir na camada criada e ir em suas “Properties” ir na aba “Symbology”->”Categories”-> em “Value Field” selecionar “NOM_UR_AFL” clicar em “Aplicar” e “OK”.

5.13 Criação dos pontos amostrais

Deve-se ir em “Geoprocessing”-> selecionar “Environments”-> “Processing Existent”-> “Same as layer limites”-> “Raster Analysis” colocar em “mask” limites/polygons do projeto e clicar em “OK”. Esse processo somente passa para o programa onde ele deve gerar os cálculos.Feito isso deve-se habilitar o “Arctoolbox” e ir na opção “Data Manager Tools”-> “Sampling”-> “Create random points”-> em “Output feature class” colocar o arquivo “Pontos de amostragem” e na em “Long” colocar 150 , que será o número de pontos. Depois disso deve-se apagar os pontos que ficaram para fora dos limites da área indo em “Editor”-> “Start editing”->selecionar o arquivo

"Pontos de amostragem" e selecionar os pontos fora do limite e clicar em "delete" após acabar esse processo ir em "Editor"-> "Stop editing".

5.14 Criar Novos Pontos Amostrais

Ir no ícone "Add date" e selecionar "Add basemap"-> "Imagery"-> "Add"-> "OK", adicionando a imagem de satélite da área. Selecionar a ferramenta "Create features". Após isso deve-se adicionar novos pontos nos lugares necessários, por exemplo, em áreas que ainda não possuem nenhum ponto e os adicionar.

5.15 Adicionar colunas de fertilidade por mg/dm na attribute table

Nesse passo vão ser adicionadas as colunas dos respectivos nutrientes escolhidos, no meu caso foi o NPK. Após a criação das colunas, estas devem ser preenchidas com os valores dos nutrientes provenientes de análises de solo. Para isso, inicialmente deve se ir no "editor" e selecionar "Start editing" e na janela que abrir selecionar o layer" Pontos amostrais", abrir o banco de dados da camada de "Pontos amostrais", indo em "Open attribute table", ali vai aparecer todos os pontos presentes no projeto, para adicionar novas colunas deve se ir em "Add Field" e em "Name" preencher com "N_Fertilidade_mg_dm" em "Type" selecionar "Float".Deve ser feito o mesmo procedimento para os demais nutrientes só alterando o nome das colunas para "P_Fertilidade_mg_dm" e "K_Fertilidade_mg_dm". Após acabar as edições ir no "Editor" e clicar em "Stop editing".

5.16 Adicionar colunas de fertilidade e adubaçãoporkg/ha naattributetable

Para isso, o "Editor" deve estar com a opção "Stop editing" selecionada, deve-se abrir o banco de dados da camada de Pontos amostrais, indo em "Open attribute table", ali vai aparecer as colunas já criadas dos nutrientes , para adicionar novas colunas deve se ir em "Add Field" e em "Name" preencher com "N_Fertilidade_Kg_ha" em "Type" selecionar "Float".Deve ser feito o mesmo procedimento para os demais nutrientes só alterando o nome das colunas para "P_ Fertilidade_Kg_ha" e "K Fertilidade Kg ha" Para criar as colunas de adubação deve-se estar com a "Attribute table" aberta e deve se ir em "Add Field" e em "Name" preencher com "N Adubação_Kg ha" em "Type" selecionar "Float".Deve ser feito o mesmo procedimento para os demais nutrientes só alterando o nome das colunas para "P_Adubação_Kg_ha" e "K_Adubação_Kg_ha".

5.17 Cálculos fertilidade

Na seleção do editor deve estar em "Stop Editing" e deve-se ir na coluna de "N_Fertilidade_Kg_ha" e clicar no botão direito do mouse e selecionar "Field Calculator"-> na aba que abrir em "Fields" selecionar a opção "N_Fertilidade_mg_dm" e fazer uma multiplicação por 2, ficando da seguinte forma "N_Fertilidade_mg_dm"*2 e clica-se em "OK". Após isso se faz o mesmo procedimento com o "P_ Fertilidade_Kg_ha" e o "K Fertilidade Kg ha", gerando os valores em Kg por ha destes nutrientes.

5.18 Cálculos de adubação

Na seleção do editor deve estar em "Stop Editing" e deve-se ir na coluna de "N_Adubação_Kg_ha" e clicar no botão direito do mouse e selecionar "Field Calculator"-> na aba que abrir em "Fields" selecionar a opção "N_Fertilidade_kg_ha" e fazer uma subtração por 20,que foi um parâmetro para a adubação fornecido pelo professor, ficando da seguinte forma "N_Adubação_Kg_ha"- 20 e clica-se em "OK". Após isso se faz o mesmo procedimento com o "P_ Fertilidade_Kg_ha" e o "K Fertilidade Kg ha", gerando os valores em Kg por ha para a adubação com esses nutrientes. No entanto para o P vai ser feita a subtração por 190 e para o K por 100, ficando das seguintes formas respectivamente "P_ Fertilidade_Kg_ha"- 190 e "K Fertilidade Kg ha"- 100.Feito isso, a tabela estará preenchida e caso algum valor nas colunas de adubação ficar negativo, deve-se apagar o valor e colocar um 0 no lugar.

5.19 Gerar mapa de fertilidade por mg/dm

Para gerar os mapas de fertilidade deve se ir no "Arctoolbox" em "Spatial analyst tools"-> "Interpolation"-> "Kriging" e na aba que abrir em "Input point features" colocar "Pontos_de_amostragem" e em "Value Field" colocar "N_fertilidade_mg_dm" e clicar em "OK".Vai ser gerado um novo arquivo que deve ser renomeado indo em "Properties" na aba "general" mudando o nome para "N_fertilidade_mg". O mesmo procedimento deve ser realizado para o P e o K, apenas alterando o arquivo em "Value Field" para "P_fertilidade_mg_dm" e "K_fertilidade_mg_dm", respectivamente. E os arquivos gerados devem ser renomeados para "P_fertilidade_mg" e "K_fertilidade_mg". Nos mapas gerados deve-se ir nas suas "Properties" em "Label"e alterar os valores das classes deixando apenas duas casas decimais após a vírgula e não deixar que ocorra a repetição de números entre as classes de fertilidade.

5.20 GERAR MAPA FERTILIDADE KG/HA

Para gerar os mapas de fertilidade deve se ir no "Arctoolbox" em "Spatial analyst tools"-> "Interpolation"-> "Kriging" e na aba que abrir em "Input point features" colocar "Pontos_de_amostragem" e em "Value Field" colocar "N_fertilidade_kg_ha" e clicar em "OK".Vai ser gerado um novo arquivo que deve ser renomeado indo em "Properties" na aba "general" mudando o nome para "N_fertilidade_ha". O mesmo procedimento deve ser realizado para o P e o K, apenas alterando o arquivo em "Value Field" para "P_fertilidade_Kg_ha" e "K_fertilidade_kg_ha", respectivamente. E os arquivos gerados devem ser renomeados para "P_fertilidade_Kg" e "K_fertilidade_kg".Nos mapas gerados deve-se ir nas suas "Properties" em "Label"e alterar os valores das classes deixando apenas duas casas decimais após a vírgula e não deixar que ocorra a repetição de números entre as classes de fertilidade,

5.21 Gerar mapa adubação

Para gerar os mapas de adubação deve se ir no "Arctoolbox" em "Spatial analyst tools"-> "Interpolation"-> "Kriging" e na aba que abrir em "Input point features" colocar "Pontos_de_amostragem" e em "Value Field" colocar "N_adubacao_kg_dm" e clicar em 15 "OK".Vai ser gerado um novo arquivo que deve ser renomeado indo em "Properties" na aba "general" mudando o nome para "N_adubacao". O mesmo procedimento deve ser realizado para o P e o K, apenas alterando o arquivo em "Value Field" para "P_adubacao_Kg_ha" e "K_adubacao_kg_ha", respectivamente. E os arquivos gerados devem ser renomeados para "P_adubacao" e "K_adubacao". Nos mapas gerados deve-se ir nas suas "Properties" em "Label"e alterar os valores das classes deixando apenas duas casas decimais após a vírgula e não deixar que ocorra a repetição de números entre as classes de adubação.

5.22 Correção Do Sistema De Projeção

Para fazer a correção do sistema de projeção deve se ir no "Arctoolbox" ir na opção "Data Manager Tools"-> "Projections and Transformation"-> "Raster"->"Project Raster", na opção "input raster"colocar o arquivo "N_adubação", no "Output Raster"-> "Coordinate Systems"-> "UTM"->"WGS 1984"-> "South Hemisphere"-> "Fuso 22 S".No mapa gerado ir em suas "Properties" e mudar seu nome para "N_projetado" e na aba "Symbology" alterar as cores e ir em "Classified" e selecionar para mostrar 9 classes e em "Label" alterar os valores das classes deixando apenas duas casas decimais após a vírgula e não deixar que ocorra a repetição de números entre as classes de projeção.O mesmo procedimento deve ser feito para o P e o K, usado os arquivos "P_adubação" e "K_adubação" e renomeando as novas camadas para "P_projetado" e

"K_projetado". Após esse procedimento deve-se ir nas "Properties" das camadas geradas na aba "Source"e verificar o "Cell size(X,Y)", que é a resolução dos pixels. Esse valor deverá ser anotado, pois vai ser usado na etapa seguinte. No meu caso foi 21,47159869.

5.23 Criar mapas de pontos de adubação

Deve se ir no "Arctoolbox" na opção "Conversion tools"-> "From raster"-> "Raster to point"->vai abrir uma nova aba em "Input raster" colocar "N_adubacao" e em "Field",selecionar "Value"-> clicar em "OK".Fazer o mesmo procedimento com o P e o K usando os arquivos "P_adubacao" e "K_adubacao".Após a geração destas novas camadas renomear para "N_pontos_de_adubacao","P_pontos_de_adubacao" e "K_pontos_de_adubacao".Após isso ir nas camadas e clicar no botão direito do mouse e clicar em "Open attribute table" o editor deve estar em "Stop editing" ir em "Add field" e adicionar uma nova coluna em "Name" colocar "N_aplicacao_kg","P_aplicacao_kg" e "K_aplicacao_kg" e em "Type" selecionar "Float", na respectiva tabela de cada nutriente, depois ir na coluna criada clicar no botão direito do mouse e selecionar "Field Calculator" na fórmula colocar "Grid code" e clicar em "*" pôr o número da resolução ao quadrado e clicar em "/" por 10000. No meu caso a fórmula ficou da seguinte forma "Grid code"*461,1583889/ 10000. Assim vai ser gerada a adubação que irá ser usada em cada ponto e na área total.Para ver a quantidade de adubação basta clicar com o botão direito na coluna "N_aplicação_Kg", e selecionando Statistics podemos ver a quantidade total de fertilizante que será aplicada na área. Para nitrogênio, a aplicação calculada foi 38184,991 kg, para fósforo foi de 64419,247 kg e para potássio a quantidade foi de 154909,798kg.

5.24 Criação Dos Mapas

Selecionar a camada desejada para fazer o mapa ir em"view"-> "Layer view"-> "File"-> "Page and file"-> selecionar o tipo de folha "A4"-> selecionar o melhor formato de acordo com a área no meu caso foi "Landscape" e clicar "OK" Ir em "Insert"-> e selecionar "Title" para gerar o título do mapa adequar tamanho e fonte conforme o necessário. Ir em "Insert"-> e selecionar "Data Frame" e clicar no botão direito do mouse indo em "Data Frame Properties"-> "Grids" e ajustar os graus, minutos e segundos da maneira que possibilite melhor visualização. Ir em "Insert"-> e selecionar "Legend"-> selecionar o arquivo do mapa a ser gerado contendo as informações,por exemplo, o arquivo de "Mapas_do solo".Para fazer edições na legenda clicar no botão direito do mouse indo em " Properties"e fazer as modificações necessárias. Ir em "Insert"-> e selecionar "nort".Selecionar o mais adequado. Ir em "Insert"-> e selecionar "Scala bar" > selecionar uma "scala line" e ir em "properties" em "Number of divisions" alterar de 2 para 4 e em "Label" alterar

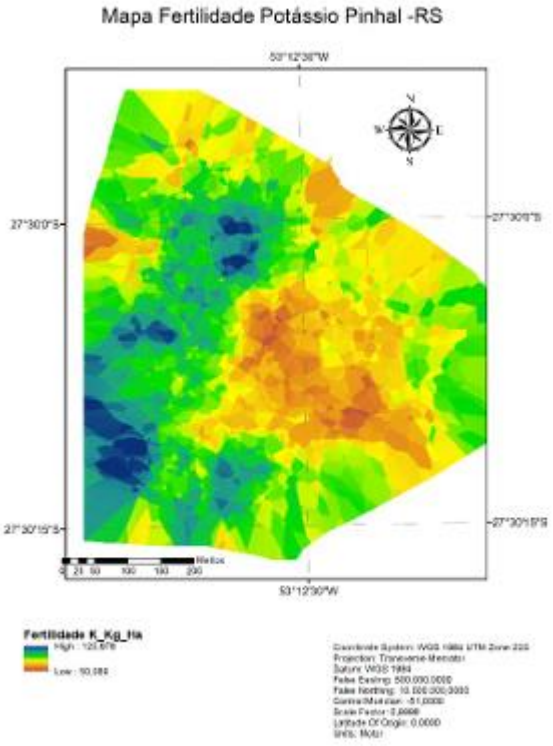
para “Km” e em “Gap” alterar para 5-> “OK”-> “OK”. Ir em “Insert”-> e selecionar “Dynamics Text-> “Coordinate system” Ir em “Insert”-> e selecionar “Dynamics Text”-> “Author”, na aba que abrir escrever o nome do autor do mapa.

5.25. EXPORTAÇÃODOSMAPAS

Ir em “File”-> “Export Map”->selecionar o formato “BMP” e alterar a “resolution” para 700.Selecionar a pasta em que se deseja salvar a imagem e clicar em “Salvar”.

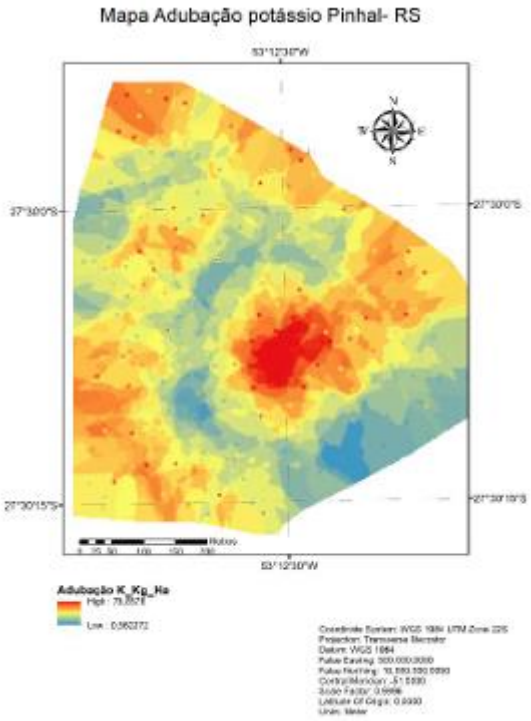
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Figura 1 - Fertilidade de K



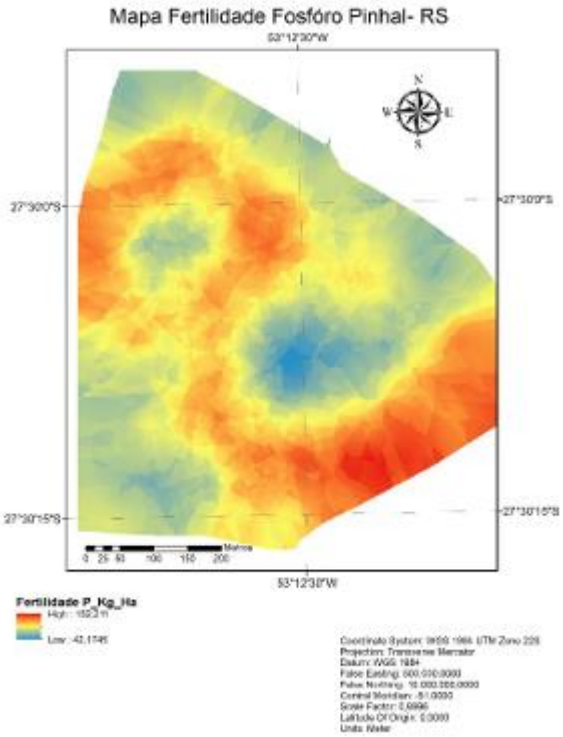
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 2 - Adubação de K.



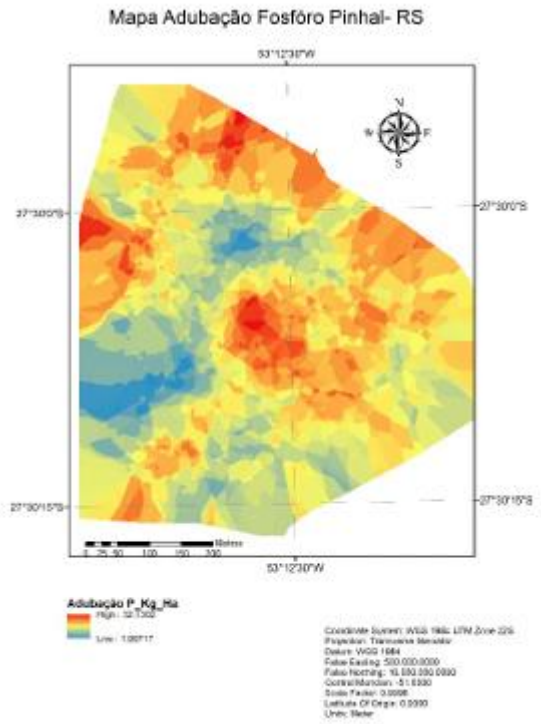
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 3 - Fertilidade de P.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 4 - Adubação de P



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A adoção da agricultura de precisão (AP) no manejo de fertilidade do solo tem se consolidado como uma ferramenta estratégica para otimizar o uso de insumos, reduzir custos e aumentar a eficiência produtiva. No entanto, os resultados obtidos dependem diretamente da variabilidade espacial real da área e das condições do sistema de produção.

No presente estudo, conduzido em uma área de 44,162 hectares, a aplicação de fertilizantes em taxa variável não apresentou o desempenho esperado, evidenciando um fracasso técnico e econômico diante das condições específicas do local. Os valores médios dos fertilizantes utilizados reforçam esse cenário: o fósforo apresentou custo de R$ 3.532,56 no manejo convencional, enquanto a AP elevou esse valor para R$ 3.586,20. Situação semelhante ocorreu no potássio, passando de R$ 4.397,00 no sistema convencional para R$ 4.582,00 na taxa variável. Assim, ao contrário do esperado — redução ou otimização do gasto — observou-se um aumento direto no custo por hectare quando se empregou a tecnologia.

A principal explicação técnica para esse resultado está no excesso de fezes suínas presentes ao longo da área, consequência de aplicações históricas e concentradas de dejetos. Esse aporte contínuo de nutrientes promoveu uma homogeneização artificial da fertilidade, sobretudo nos teores de P e K, reduzindo drasticamente a variabilidade espacial detectável pela AP. Com baixa

variância, a recomendação de taxa variável perdeu eficiência, tornando-se, na prática, mais cara e sem retorno agronômico correspondente.

Além disso, a saturação de alguns nutrientes — especialmente fósforo — pode ter mascarado ainda mais a heterogeneidade natural do solo, levando o sistema de precisão a delimitar zonas de manejo pouco representativas ou até desnecessárias. Nesse contexto, o manejo convencional mostrou-se mais adequado, tanto pela simplicidade operacional quanto pelo menor custo final. Portanto, conclui-se que a agricultura de precisão não deve ser aplicada de forma generalizada, mas sim analisada caso a caso, considerando o histórico da área, a presença de fontes externas de nutrientes (como dejetos animais) e o real grau de variabilidade espacial. Em áreas como esta, marcadas por forte aporte orgânico e baixa variação entre glebas, o manejo convencional em taxa fixa pode ser economicamente superior, evitando investimentos que não se convertem em ganhos produtivos ou ambientais.

Assim, este estudo reforça a importância de diagnósticos prévios robustos, integrando análise de solo, histórico de manejo e avaliação crítica da variabilidade, para que a agricultura de precisão seja aplicada de forma eficiente, sustentável e economicamente justificável.

4 CONCLUSÃO

Com o presente projeto, conclui-se que o ArcMap é uma ferramenta poderosa e de diversos usos para dados geoespaciais, podendo interpolar informações e gerar mapas úteis. É uma ferramenta que, como neste trabalho, pode ser utilizada a favor da agricultura de precisão, gerando mapas preciso que mostram as demandas específicas de cada área. É um software que se mostra eficiente, no entanto, possui um certo grau de dificuldade para leigos em tecnologias. Mas, os objetivos do presente trabalho foram alcançados. Um dos dados evidenciados pelo trabalho foi a eficácia ao se aplicar a agricultura de precisão, pois os gastos usando os dados fornecidos de adubação pelo software geraram custos muitos menores comparados com a aplicação feita da forma mais convencional, mas esse resultado pode ser questionado. Portanto, o ArcGis cumpriu com o esperado de gerar e elaborar mapas, fornecendo informações sobre a adubação. Por fim, as aulas e o ArcGis cumpriram com o esperado e o objetivo da disciplina foi alcançado.

REFERÊNCIAS

MANZATTO, C. V.; FREITAS JUNIOR, E.; PERES, J. R. R. **Agricultura de precisão: diagnóstico e perspectivas.** Brasília: Embrapa, 1999.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 2. ed. Viçosa: UFV, 1998.

ROZA, D. **Agricultura de precisão: conceitos e aplicações**. Porto Alegre: UFRGS, 2000.

ESRI. **ArcGIS Desktop: Release 10**. Redlands: Environmental Systems Research Institute, 2011. (Opcional, caso queira citar o software usado)

CAPÍTULO 19

APLICAÇÃO DO GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO NA ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DE HORTALIÇAS

Jonathas Ranver da Silva Santos
IF SERTÃO-PE, Brasil

Augusto Yann Cordeiro Freire
Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Brasil

Marcelo dos Santos de Azevedo
Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Brasil

Ângelo Gabriel Pereira Silva
Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Brasil

Alessandro Kayke Pessoa Gama de Sá
Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Brasil

Henrique Marcos Batista da Gama
Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Brasil

Heitor Granja Bonfim
Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Brasil

Érika Victoria Oliveira Bonfim
Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Brasil

Jocilânia Gomes de Caldas
Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Brasil

Evelyn Auane de Oliveira Castro
Universidade Federal do Vale do São Francisco, IF SERTÃO-PE, Brasil

DOI: 10.52832/wed.221.1316

Resumo: O presente estudo teve como objetivo analisar a aplicação do geoprocessamento e do sensoriamento remoto na estimativa da produtividade de culturas olerícolas, identificando as principais metodologias empregadas e as lacunas existentes na literatura. A pesquisa consistiu em uma revisão bibliográfica qualitativa realizada na base Scopus, contemplando estudos publicados entre 2015 e 2026 sobre alface, cenoura, batata, tomate e cebola. Os resultados evidenciaram que o uso de técnicas de aprendizado de máquina, inteligência artificial, índices espectrais e sensoriamento remoto tem ampliado a capacidade de prever a produtividade agrícola de forma antecipada. Entre as abordagens mais empregadas destacam-se redes neurais artificiais, floresta aleatória e modelos híbridos, frequentemente associados a imagens de satélite, drones, sensores e variáveis ambientais. O NDVI destacou-se como um dos índices espectrais mais utilizados, embora apresente limitações relacionadas às características das culturas e às condições de cultivo. Além disso, tecnologias de visão computacional e sistemas automatizados de monitoramento têm contribuído para análises mais detalhadas, especialmente em ambientes controlados. Conclui-se que a integração entre geoprocessamento, sensoriamento remoto e técnicas avançadas de modelagem apresenta elevado potencial para aprimorar a estimativa da produtividade em olerícolas, embora ainda existam desafios relacionados à integração de dados, padronização metodológica e ampliação da aplicação prática dessas ferramentas.

Palavras-chave: Agricultura de precisão, Olerícolas, Produção vegetal.

1 INTRODUÇÃO

A produtividade agrícola é determinada por um conjunto de fatores ambientais, edáficos, biológicos e genéticos, como clima, características do solo, disponibilidade de nutrientes, teor de água, ocorrência de pragas, doenças e o potencial das cultivares. Nesse sentido, a estimativa precisa da produtividade por meio do geoprocessamento e sensoriamento remoto torna-se um ponto-chave no planejamento eficaz, gestão de recursos agrícolas e redução de riscos econômicos (Karbasi *et al.*, 2026) As estimativas de produtividade podem ser realizadas por distintas abordagens. A mais tradicional baseia-se na delimitação das áreas cultivadas por imagens de satélite, associada a dados médios de rendimento. Outras metodologias utilizam a estimativa de parâmetros biofísicos e bioquímicos relacionados ao vigor vegetal ou aplicam modelos estatísticos empíricos que correlacionam variáveis espectrais obtidas por sensores terrestres, aerotransportados e orbitais com a produtividade observada. Portanto, esses métodos representam uma alternativa prática e eficaz para a previsão da produção agrícola quando bem ajustados às condições locais (Ali *et al.,* 2022).

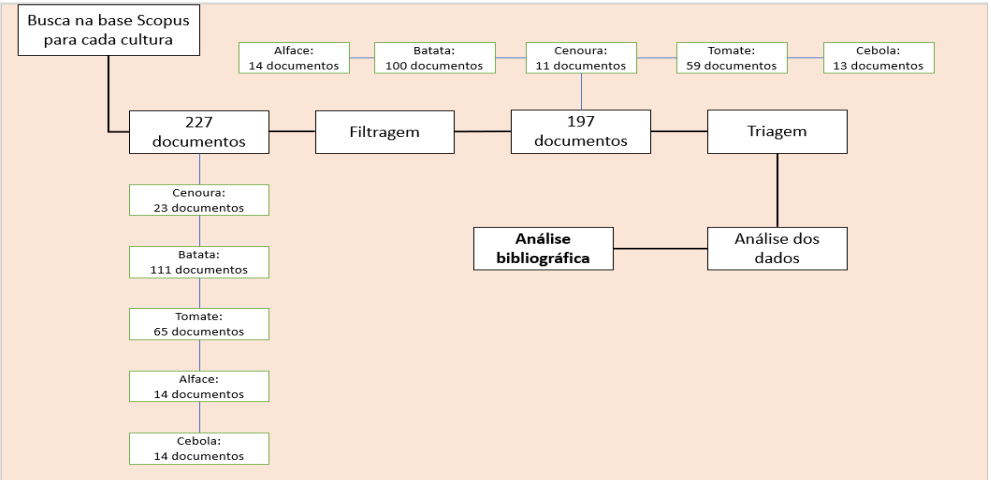
O cenário atual em torno de estudos sobre a estimativa de produtividade em hortaliças é caracterizado por seu amplo potencial, composto por pesquisas que abrangem diferentes culturas olerícolas, e exploram, de forma simultânea, diversas metodologias para a predição da produtividade. Entretanto, apesar dos avanços, muitos modelos ainda apresentam limitações quanto à generalização espacial e temporal, especialmente em culturas olerícolas, que possuem alta variabilidade fisiológica e de manejo. Adicionalmente, estudos com foco em torno do geoprocessamento e sensoriamento remoto em olerícolas não possuem o mesmo alcance quando

comparados às culturas frutíferas, e principalmente em grãos. O presente estudo tem como objetivo reunir estudos sobre olerícolas, identificar as principais metodologias e lacunas presentes nas pesquisas.

2 METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de abordagem qualitativa, com objetivo de analisar a produção científica relacionada à estimativa da produtividade de culturas olerícolas por meio de ferramentas relacionadas ao geoprocessamento e sensoriamento remoto. A coleta de dados foi realizada na base Scopus de dados (Elsevier), em março de 2026, utilizando estratégias de busca (strings) específicas para cada cultura selecionada: alface, cenoura, batata, tomate e cebola. A seleção das culturas buscou contemplar diferentes grupos olerícolas, incluindo hortaliças folhosas (alface), raízes (cenoura), tuberosas (batata), frutos (tomate) e bulbos (cebola), com o objetivo de proporcionar uma visão mais abrangente e integrada da olericultura como um todo. Os documentos selecionados correspondem a artigos e artigos de conferência.

Figura 1 – Metodologia da pesquisa aplicada.



Fonte: Autores, 2026.

2.1 Busca de dados e critérios de inclusão

A estratégia de busca foi elaborada com o objetivo de incluir estudos alinhados ao foco da pesquisa, combinando termos relacionados ao nome popular e científico da cultura com palavras-chave associadas à produtividade, sensoriamento remoto, métodos de estimativa, grupo olerícola (no caso da cenoura por meio da palavra-chave "root crops", com objetivo ampliar a recuperação de estudos, uma vez que essa cultura é frequentemente classificada na literatura internacional como hortaliça de raiz), entre outros. Com essa abordagem, foi possível obter um conjunto consistente e

relevante de documentos sobre o tema. Esse mesmo processo de combinação de termos foi aplicado às demais culturas analisadas. Os idiomas considerados nos estudos foram inglês e chinês. Adicionalmente, foram considerados documentos revisados por pares. Como a busca foi realizada exclusivamente na base Scopus, não foram identificados registros duplicados. De cada estudo selecionado foram extraídas informações referentes à cultura avaliada, ferramentas empregadas, plataforma de aquisição dos dados, algoritmos utilizados, variável agrícola analisada, métricas de desempenho e principais limitações relatadas pelos autores

2.1.1 Busca de dados sobre a cenoura

Para a cenoura foi utilizada a string: TITLE-ABS-KEY (("carrot" OR "Daucus carota" OR "root crops") AND ("yield" OR "productivity" OR "biomass") AND ("remote sensing" OR "satellite" OR UAV OR drone OR "vegetation index") AND ("model" OR "machine learning" OR "estimation")). No caso específico da cenoura, a aplicação dessas palavras-chave na base de dados Scopus resultou na recuperação de 23 documentos relacionados ao tema.

2.1.2 Busca de dados sobre a batata

A obtenção de dados para a pesquisa sobre a cultura da batata se deve a string: TITLE-ABS-KEY (("potato" OR "Solanum tuberosum") AND ("yield prediction" OR "productivity forecasting" OR "crop estimation") AND ("remote sensing" OR "satellite imagery" OR "UAV" OR "drone" OR "hyperspectral" OR "multispectral" OR "LiDAR" OR "geoprocessing" OR "GIS" OR "precision agriculture" OR "machine learning" OR "deep learning")). A busca resultou em 111 documentos.

2.1.3 Busca de dados sobre o tomate

Na cultura do tomate, foi utilizada a string: TITLE-ABS-KEY (("tomato" OR "Solanum lycopersicum") AND ("yield prediction" OR "productivity forecasting" OR "crop estimation") AND ("remote sensing" OR "satellite imagery" OR "UAV" OR "drone" OR "hyperspectral" OR "multispectral" OR "LiDAR" OR "geoprocessing" OR "GIS" OR "precision agriculture" OR "machine learning" OR "deep learning")). A busca resultou em 65 documentos.

2.1.4 Busca de dados sobre a alface

Para a cultura da alface foi utilizada a string: TITLE-ABS-KEY ("lettuce" OR "Lactuca sativa") AND ("yield prediction" OR "productivity forecasting" OR "crop estimation") AND ("remote sensing" OR "satellite imagery" OR "UAV" OR "drone" OR "hyperspectral" OR

"multispectral" OR "LiDAR" OR "geoprocessing" OR "GIS" OR "precision agriculture" OR "machine learning" OR "deep learning"). A busca resultou em 14 documentos.

2.1.5 Busca de dados sobre a cebola

Na cultura da cebola foi utilizada a string: TITLE-ABS-KEY (("onion" OR "Allium cepa") AND ("yield prediction" OR "productivity forecasting" OR "crop estimation") AND ("remote sensing" OR "satellite imagery" OR "UAV" OR "drone" OR "hyperspectral" OR "multispectral" OR "LiDAR" OR "geoprocessing" OR "GIS" OR "precision agriculture" OR "machine learning" OR "deep learning")). A busca resultou em 14 documentos.

2.2 Critérios De Exclusão

2.2.1 Filtragem

A filtragem correspondeu a uma etapa eliminatória de documentos que não se enquadraram nos requisitos de inclusão na pesquisa, fragmentada em duas etapas. 1) filtragem de documentos que não se enquadraram na janela temporal (2015 a 2026). A janela de tempo foi definida visando o agrupamento de estudos atuais sobre o tema, considerando a constante evolução de métodos preditivos utilizados na agricultura, nesse sentido, foram excluídos os documentos anteriores a 2015. 2) filtragem por área temática. A filtragem foi realizada excluindo áreas temáticas que não dialogam com o tema. Áreas como "Física e astronomia", "Ciências dos materiais", "Farmacologia", entre outras, foram excluídas na pesquisa. A aplicação dos critérios de exclusão resultou em 11 documentos para a cultura da cenoura. 100 documentos para a cultura da batata. 59 para a cultura do tomate. 14 para a cultura da alface. 13 para a cultura da cebola. Totalizando 197 documentos, logo resultando na exclusão direta de 30 documentos.

2.3 TRIAGEM E ANÁLISE DOS DADOS

Após a filtragem, foram identificados 197 documentos potencialmente relevantes. Em seguida, realizou-se a triagem por título e resumo, seguida da leitura na íntegra dos estudos mais alinhados ao objetivo da pesquisa. Os trabalhos foram classificados de forma temática, considerando as culturas da cenoura, alface, batata, tomate e cebola. Para a construção das seções de resultados e discussão de cada cultura, foram selecionados os estudos considerados mais representativos das principais linhas de pesquisa identificadas na literatura, totalizando três estudos para a cenoura, quatro para a alface, cinco para a batata, quatro para o tomate e três para a cebola. Essa seleção teve como objetivo sintetizar as abordagens predominantes sem tornar a discussão excessivamente descritiva ou repetitiva. Os demais documentos analisados não foram excluídos da revisão, sendo

utilizados na identificação de tendências recorrentes, limitações metodológicas, lacunas de conhecimento e perspectivas futuras. Dessa forma, a análise dos dados foi conduzida de maneira descritiva e interpretativa, buscando identificar padrões, convergências e oportunidades de pesquisa a partir do conjunto completo dos estudos avaliados. Os resultados dessa síntese temática são apresentados e discutidos a seguir.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Cenoura

Na cultura da cenoura, predominam estudos baseados em sensoriamento remoto utilizando imagens de satélite de alta resolução e índices espectrais relacionados ao vigor vegetativo, como NDVI e SAVI. Essas ferramentas permitem a delimitação de zonas de manejo dentro dos talhões e a identificação de áreas com diferentes potenciais produtivos. A integração entre dados de reflectância e informações de produtividade obtidas em campo possibilita a construção de modelos capazes de estimar a produtividade em escala de talhão, contribuindo para a identificação de áreas que necessitam de ajustes de manejo e para uma tomada de decisão mais eficiente (Suarez; Sprang, 2020). Além das imagens de satélite, observa-se a utilização de algoritmos de aprendizado de máquina, como redes neurais artificiais, floresta aleatória e modelos de regressão, associados a variáveis biométricas e de qualidade das raízes, incluindo peso, tamanho, teor de sólidos solúveis e firmeza. De modo geral, os estudos indicam que a combinação de dados agronômicos e espectrais amplia a capacidade de predição da produtividade, enquanto os índices NDVI e SAVI se destacam entre os mais empregados para o monitoramento da cultura (Silva *et al.*, 2024).

Quanto ao horizonte de previsão, as estimativas apresentam maior potencial durante os estádios intermediários de desenvolvimento da cultura, especialmente entre 60 e 75 dias após o plantio, período considerado mais adequado para o monitoramento por imagens de satélite, como as do Sentinel-2 (Madugundu *et al.*, 2024). Entretanto, algumas limitações ainda são observadas, como a saturação dos índices espectrais em estágios avançados da cultura, a influência da umidade do solo e da cobertura parcial do dossel, fatores que podem reduzir a precisão dos modelos e evidenciam a necessidade da integração de múltiplas fontes de dados.

3.2 ALFACE

A previsão de produtividade na cultura da alface destaca-se em sistemas hidropônicos e aeropônicos (presente em 50% dos estudos). Em sistemas hidropônicos é recorrente o uso de aprendizado de máquina, caracterizado como uma ferramenta promissora, possibilitando a análise simultânea de múltiplas variáveis que influenciam a produtividade (Sharmin; Hasan; Uddin, 2025).

Destaca-se também, nesse sistema de cultivo, o potencial do uso da rede neural profunda na predição da produtividade da alface fresca, caracterizada como uma ferramenta rápida e de aplicabilidade promissora em larga escala (Mokhtar *et al.*, 2022).

Em sistemas aeropônicos, a previsão da produtividade da alface tem sido realizada por meio de algoritmos de aprendizado de máquina, como o ElasticNet, associados a dados obtidos por sensores instalados no sistema de cultivo. Essa abordagem permite integrar múltiplas variáveis ambientais e produtivas, contribuindo para a construção de modelos preditivos mais robustos e para o monitoramento contínuo da produção (Rajendiran; Rethnaraj, 2025). De forma semelhante, os mesmos autores Rajendran e Ratnaraj em um trabalho anterior (2023), observam a aplicação da Floresta Aleatória utilizando informações ambientais e produtivas para estimar o desempenho da cultura em sistemas aquapônicos (Rajendiran; Rethnaraj, 2023).

De modo geral, os estudos indicam que a combinação entre sensores e técnicas de inteligência artificial apresenta potencial para aprimorar a estimativa da produtividade da alface em ambientes controlados. Entretanto, a eficiência dos modelos depende da qualidade dos dados coletados e das características específicas de cada sistema de cultivo, evidenciando a necessidade de adaptações conforme as condições de produção. Além disso, essas tecnologias complementam as abordagens de sensoriamento remoto ao fornecer informações detalhadas sobre o desenvolvimento das plantas e as condições do ambiente de cultivo.

3.3 Batata

A previsão da produtividade da batata apresenta grande diversidade de metodologias, utilizando diferentes fontes de dados, como imagens de satélite, veículos aéreos não tripulados (VANTs) e informações espectrais relacionadas ao vigor vegetativo. Entre essas abordagens, destacam-se as imagens do Sentinel-2 associadas a algoritmos de aprendizado de máquina, permitindo o monitoramento em larga escala e a realização de previsões antecipadas da produção. (Gomez et al., 2019). Além do uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs) combinado a índices de vegetação amplia a capacidade de monitoramento da cultura e contribui para estimativas mais detalhadas do desenvolvimento das plantas (Zhang *et al.,* 2025).

Outra vertente relevante envolve a aplicação de modelos híbridos de inteligência artificial, que integram dados climáticos, históricos de produtividade, uso de insumos e outras variáveis relacionadas ao sistema produtivo. Essas abordagens têm sido utilizadas para aprimorar a capacidade preditiva dos modelos e fornecer estimativas mais robustas, inclusive em cenários associados à variabilidade climática e à agricultura sustentável. Adicionalmente, alguns modelos

possibilitam previsões em tempo quase real, auxiliando o planejamento agrícola e a otimização do uso de recursos (Fariz; Basha, 2025; Koppula *et al*., 2025).

Outra vertente volta-se a doenças, caracterizadas como fatores de influência determinantes na produtividade da planta. Nesse sentido, o uso do modelo híbrido CNN + XGBoost correlaciona o aspecto fitossanitário da planta com sua produtividade, analisando as características, a presença e a severidade de doenças e dados ambientais para predizer a produtividade da planta (Rikendra; Sharma; Chauhan, 2025). De forma geral, observa-se uma tendência crescente de integração entre sensoriamento remoto, inteligência artificial e monitoramento fitossanitário, embora a eficiência dos modelos permaneça dependente da qualidade dos dados utilizados e das condições específicas de cada região e sistema de cultivo

3.4 TOMATE

A cultura do tomate vincula-se à elevada importância econômica e social no Brasil, destacando-se por sua relevância na cadeia agroindustrial. Dessa forma, a previsão da produtividade torna-se essencial ao abastecimento da cadeia comercial da hortaliça. Entre os estudos sobre estresse hídrico no tomate, nota-se o uso do índice CWSI para a detecção do estresse, porém, o mesmo índice pode ser aplicado para estabelecer uma relação significativa com a produtividade, por meio da equação linear estabelecida (Produtividade total = −2398,9CWSI + 1240,4) pode-se constatar que o aumento do estresse hídrico está diretamente associado à redução do rendimento, consequentemente, o CWSI mostra-se eficaz não apenas para monitoramento do estado hídrico do tomateiro, mas à estimativa antecipada da produtividade (Boyaci *et al.,* 2024). Entretanto, sua aplicação pode ser influenciada pelas condições específicas de cultivo, manejo e ambiente, exigindo cautela na extrapolação dos resultados para diferentes realidades produtivas

Outra vertente concentra-se no uso de sistemas de visão computacional para monitoramento da produção em ambientes protegidos. Tecnologias como o CB-YOLO-DeepSORT permitem identificar frutos, acompanhar o desenvolvimento e classificar estágios de maturação, fornecendo informações que auxiliam o manejo e a definição do momento adequado de colheita. (Xing *et al.,* 2025). De forma semelhante, a tecnologia RGB-D associada a modelos de aprendizado profundo possibilita a obtenção de informações sobre características dos frutos, como tamanho e peso, contribuindo para estimativas mais detalhadas da produção e fortalecendo aplicações da agricultura de precisão (Hong *et al.,* 2024).

É necessário ressaltar em caráter conclusivo o crescente potencial de redes neurais profundas (DNN) na estimação da produtividade do tomate em ambientes controlados, uma vez que consideram variáveis ambientais e agronômicas para a predição, resultando em uma análise

mais completa e precisa. A alta dimensionalidade das variáveis reflete diretamente no potencial da ferramenta aplicada na agricultura de precisão (Ali *et al.,* 2025). Dessa forma, a integração entre sensores, visão computacional e aprendizado profundo representa uma das principais tendências para o monitoramento e previsão da produtividade da cultura

3.5 Cebola

A predição da produtividade da cebola por meio do sensoriamento remoto destaca-se como uma estratégia importante visando o melhor planejamento agrícola e tomada de decisão precisa, tornando-se uma ferramenta relevante para a agricultura de precisão. Entretanto, a adaptação à variáveis como a morfologia da cultura e variações climáticas determinam o sucesso e precisão da predição.

O NDVI é um índice amplamente utilizado na predição, porém, a morfologia da cebola é caracterizada por folhas alongadas e eretas, resultando em baixa cobertura vegetal. Paralelamente, a eficácia do NDVI como ferramenta preditiva é afetada. Visando a elevação da precisão é necessário a utilização de uma máscara para a remoção de pixels com NDVI inferior a 0,2 (Hashimoto *et al.,* 2025).

A cebola é produzida majoritariamente na região sul do Brasil (Costa; Resende, 2007; IBGE, [s.d]), caracterizada por altos índices de precipitação, o que impacta a precisão dos modelos preditivos, uma vez que modelos desenvolvidos em ambientes controlados tendem a apresentar desempenho inferior quando aplicados a essas condições. Dessa forma, para regiões com maior variabilidade hídrica, recomenda-se a integração de imagens multiespectrais, obtidas por drones, e técnicas de aprendizado de máquina, visando identificar diferenças sutis mesmo sob condições climáticas adversas (Wayal *et al*., 2026)

Em síntese, os estudos sobre a cebola destacam a incompatibilidade de um método universal de predição, padrão que se repete nas outras culturas. A ferramenta e metodologia escolhida para a predição deve coincidir com as características morfológicas da planta, características do solo, variações climáticas, características regionais, entre outros. Assim, estudos que combinem fatores climáticos e produtivos com aprendizado de máquina podem contribuir significativamente no planejamento agrícola, possibilitando novas vertentes de pesquisa e aplicação (Iqbal *et al*., 2022).

3.6 Lacunas e perspectivas futuras

Apesar dos avanços recentes na aplicação do geoprocessamento e sensoriamento remoto para predição da produtividade agrícola em olerícolas, ainda persistem limitações importantes que

restringem a aplicabilidade desses métodos em larga escala. Observa-se que muitos estudos são conduzidos em condições específicas, como ambientes controlados, cultivos hidropônicos ou experimentos localizados, o que compromete a capacidade de generalização dos modelos para diferentes regiões, sistemas de cultivo e variabilidade climática. Adicionalmente, há uma fragmentação no uso das fontes de dados, uma vez que imagens, variáveis ambientais, dados de solo e informações de manejo nem sempre são integrados de forma conjunta. Soma-se a isso a ausência de padronização nas métricas de avaliação, dificultando comparações diretas entre modelos, e a dependência de abordagens pouco interpretáveis, que limitam a tradução dos resultados em decisões práticas no campo. Em culturas com características específicas, como baixa cobertura do solo, também se evidenciam limitações nos índices espectrais tradicionais, o que pode afetar a precisão das estimativas. Outro ponto refere-se ao uso de modelos híbridos que apesar do alto desempenho, apresentam elevada complexidade computacional, o que limita sua aplicação em propriedades de pequeno porte. As principais perspectivas indicam que os próximos avanços estejam centrados no desenvolvimento de modelos mais integrados, capazes de combinar múltiplas fontes de dados, como imagens multiespectrais, sensores em campo e variáveis climáticas, em estruturas preditivas mais robustas e adaptáveis. A incorporação de técnicas que aumentem a interpretabilidade dos modelos tende a ampliar sua utilidade prática, aproximando os resultados das necessidades reais dos produtores. Paralelamente, o uso de sensoriamento remoto de alta resolução, aliado a plataformas de monitoramento contínuo e sistemas automatizados, tende a favorecer a construção de soluções em tempo real para o manejo agrícola.

4 CONCLUSÃO

A análise dos estudos demonstra que o uso integrado de sensoriamento remoto e ferramentas computacionais tem potencial para transformar a forma como a produtividade agrícola é estimada, tornando os processos mais precisos, dinâmicos e baseados em dados. As diferentes abordagens apresentadas ao longo do capítulo reforçam que não há um modelo único ideal, mas sim soluções que devem ser ajustadas conforme a cultura, o ambiente e a disponibilidade de informações. Por outro lado, a consolidação dessas tecnologias no campo ainda depende de avanços importantes, principalmente na integração de múltiplas fontes de dados e na adaptação dos modelos a diferentes realidades produtivas. Consequentemente, o futuro da predição de produtividade em olerícolas tende a caminhar para sistemas mais acessíveis, interpretáveis e aplicáveis no cotidiano do produtor, contribuindo não apenas para o aumento da eficiência produtiva, mas também para uma agricultura mais sustentável e resiliente.

REFERÊNCIAS

ALI, ABDELRAOUF M. *et al.* Crop yield prediction using multi sensors remote sensing: review article. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences**, v. 25, n. 2, p. 695–706, 2022.

ALI, HASSAN *et al.* A deep neural network for tomato yield prediction in controlled environment agriculture. *In:* **World Sustainability Series**. Cham: Springer, 2025. p. 329–337. DOI: 10.1007/978-3-032-00098-9_27.

BOYACI, S. *et al.* Crop Water Stress Index (CWSI) Evaluation for Tomatoes Grown in a High Tunnel Greenhouse under Different Irrigation Levels. **Atmosphere**, v. 15, n. 2, p. 205, 2024. DOI: 10.3390/atmos15020205.

COSTA, N. D.; RESENDE, G. M. de (ed.). **Cultivo da cebola no Nordeste**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2007. (Embrapa Semi-Árido. Sistemas de Produção, 3). ISSN 1807-0027. Disponível em: http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/162405.

FARIZ, T. K. NIDA; BASHA, S. SHARIEF. Enhanced crop yield prediction using a hybrid artificial neural network with coati optimization algorithm. **Results in Engineering**, v. 28, art. 107529, 2025. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.107529.

GÓMEZ, D. *et al.* Potato yield prediction using machine learning techniques and Sentinel-2 data. **Remote Sensing**, v. 11, n. 15, art. 1745, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/rs11151745.

HASHIMOTO, M. *et al.* Improving the accuracy of onion yield estimation using NDVI image masking. **Engineering in Agriculture, Environment and Food**, v. 18, n. 4, p. 240–251, 2025. DOI: https://doi.org/10.37221/eaef.18.4_240.

HONG, SUK-JU *et al.* On-Plant Size and Weight Estimation of Tomato Fruits Using Deep Neural Networks and RGB-D Imaging. **Journal of the ASABE**, v. 67, n. 2, p. 439–450, 2024. DOI: https://doi.org/10.13031/ja.15746.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **IBGE Explica: Produção agropecuária – Cebola**. Rio de Janeiro: IBGE, [s.d.]. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/cebola/br. Acesso em: 18 jun. 2026.

IQBAL, L. B. *et al.* OnionBangla: a supervised machine learning approach to predict onion yield using climate data from Bangladesh. In: International Conference on Computing Theory and Applications (ICCTA), 32., 2022, Alexandria. Proceedings [...]. Alexandria: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2022. p. 110–115. DOI: https://doi.org/10.1109/ICCTA58027.2022.10206199.

KARBASI, M. et al. Utilizing soil characteristics and hybrid machine learning for interpretable potato yield prediction: a study with satin-bowerbird optimization and deep neural network. **Field Crops Research**, v. 338, art. 110311, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.110311.

KOPPULA, S. B. *et al.* Predicting potato crop yield with latest deep learning approaches for sustainable agriculture. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Machine Learning Applications: Healthcare and Internet of Things (AIMLA

2025). Namakkal: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2025. DOI: https://doi.org/10.1109/AIMLA63829.2025.11040550.

MADUGUNDU, R. *et al.* Optimal timing of carrot crop monitoring and yield assessment using Sentinel-2 images: a machine-learning approach. **Applied Sciences**, v. 14, n. 9, p. 3636, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/app14093636.

MOKHTAR, A. *et al.* Using Machine Learning Models to Predict Hydroponically Grown Lettuce Yield. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, art. 706042, 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2022.706042.

RAJENDIRAN, G.; RETHNARAJ, J. Lettuce crop yield prediction analysis using random forest regression machine learning model in aeroponics system. *In:* Proceedings of the 2023 2nd International Conference on Augmented Intelligence and Sustainable Systems (ICAISS 2023), 2023, Trichy. Proceedings [...]. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. p. 565–572. DOI: 10.1109/ICAISS58487.2023.10250535.

RAJENDIRAN, G.; RETHNARAJ, J. Lettuce yield prediction: ElasticNet regression model (ElNetRM) for indoor aeroponic vertical farming system. **International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems**, v. 16, n. 9, p. 683–695, 2025. DOI: 10.32985/ijeces.16.9.5.

RIKENDRA *et al.* A deep learning-based framework for disease detection and yield enhancement in five major crops. **International Journal of Applied Mathematics**, v. 38, n. 4S, p. 952–971, 2025. DOI: 10.12732/ijam.v38i4s.282.

SHARMIN, S. *et al.* A review of machine learning approaches for predicting lettuce yield in hydroponic systems. **Smart Agricultural Technology**, v. 11, art. 100925, 2025. DOI: 10.1016/j.atech.2025.100925.

SILVA, Y. K. de L. *et al.* AI-based prediction of carrot yield and quality on tropical agriculture. **Agri Engineering**, v. 6, n. 1, p. 361–374, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/agriengineering6010022.

SUAREZ, A.; VAN SPRANG, C. Remote sensing to predict yield of vegetable crops – fact sheet (VG16009). Hort Innovation, 2020. Disponível em: https://www.horticulture.com.au/globalassets/hort-innovation/resource-assets/vg16009-fact-sheet---remote-sensing-yield-veg-crops.pdf.

WAYAL, S. M. *et al.* UAV multispectral sensing and data-driven modeling for precision onion yield prediction. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, art. 1696730, 2026. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1696730.

XING, Y. *et al.* CB-YOLO-DeepSORT: real-time yield estimation for tomatoes in greenhouses. *In:* **15th IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems (CYBER 2025**), 2025, Shanghai. Proceedings [...]. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2025. p. 66–71. DOI: 10.1109/CYBER67662.2025.11168194.

ZHANG, ZI-TAI *et al*. Estimation of potato above-ground biomass using UAV multispectral imagery and biomass allocation patterns. **Spectroscopy and Spectral Analysis**, v. 45, n. 8, p. 2348–2356, 2025. DOI: https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2025)08-2348-09.

CAPÍTULO 20

ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NO MONITORAMENTO DA PRODUTIVIDADE DO MILHO EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE NITROGÊNIO NO SEMIÁRIDO SERGIPANO

Barbara Nascimento Santos
Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Biodiversidade, Universidade Federal de Sergipe – Brasil

Jacilene Francisca Souza Santos
Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Biodiversidade, Universidade Federal de Sergipe – Brasil

Nartênia Susane Costa Aragão
Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Biodiversidade, Universidade Federal de Sergipe – Brasil

Carla Nayara da Silva Lima
Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Biodiversidade, Universidade Federal de Sergipe – Brasil

Mikaely Rosendo dos Santos
Departamento de Engenharia Agronômica do Sertão, Universidade Federal de Sergipe – Brasil

Carlos Emanuel Brito dos Santos
Departamento de Engenharia Agronômica do Sertão, Universidade Federal de Sergipe – Brasil

José Felipe Dantas Lima
Departamento de Engenharia Agronômica do Sertão, Universidade Federal de Sergipe – Brasil

Tâmara Rebecca Albuquerque de Oliveira
Departamento de Engenharia Agronômica do Sertão, Universidade Federal de Sergipe – Brasil

José Jairo Florentino Cordeiro Junior
Departamento de Engenharia Agronômica do Sertão, Universidade Federal de Sergipe – Brasil

Gustavo Hugo Ferreira de Oliveira
Departamento de Engenharia Agronômica do Sertão, Universidade Federal de Sergipe – Brasil

DOI: 10.52832/wed.221.1317

Resumo: A produtividade do milho (*Zea mays* L.) é um dos parâmetros agronômicos de maior interesse para os agricultores, entretanto, ainda é um desafio explorar e manter seu potencial produtivo. Identificar índices de vegetação (IV) potenciais para o monitoramento do rendimento final do milho sob condições de alto e baixo nitrogênio em região semiárida de Sergipe. Foram avaliadas 50 genótipos de milho na Fazenda Experimental da Universidade Federal de Sergipe, em Nossa Senhora da Glória, na safra de 2024. Utilizou-se delineamento em blocos casualisados, em esquema de parcelas subdivididas, com três repetições. As parcelas corresponderam aos níveis de nitrogênio (alto e baixo), e as subparcelas, aos genótipos. Realizaram-se quatro voos com drone a 80 m de altura, extraindo cinco IV RGB de cada orthomosaico. Realizou-se análise de correlação entre os IV e a produtivididade, e o comportamento temporal dos índices. Verificou-se correlações positivas entre os índices VARI e NGRDI com a produtividade, principalmente nos voos realizados nos estágios V7/V8 e R1. Esses índices apresentaram melhores capacidades em diferenciar o rendimento da cultura. Os índices VARI e NGRDI destacaram-se como ferramentas eficientes para o monitoramento do rendimento do milho sob condições contrastantes de nitrogênio no semiárido.

Palavras-chave: Drone. Fenotipagem de alto rendimento. RGB. *Zea mays* L.

1 INTRODUÇÃO

A cultura do milho (*Zea mays* L.) apresenta grande importância a nível global, com significativa relevância nos setores alimentícios, econômicos e industriais. No entanto, a manutenção de seu potencial produtivo é desafiadora, particularmente em regiões semiáridas, onde a irregularidade pluviométrica e os longos períodos de estiagem são intensificados e acabam limitando o desempenho da cultura (Feitosa *et al.*, 2025; Nogueira *et al.*, 2023).

O rendimento final do milho depende de uma série de fatores em equilíbrio, como disponibilidade hídrica durante o ciclo da cultura, suprimento adequado de nutrientes, principalmente nos estágios fenológicos críticos, de definição do potencial produtivo, eficiência fotossintética e genótipos adaptados a esse tipo de ambiente (Fancelli, 1988; Ren *et al.*, 2023).

Entre os nutrientes de maior exigência pela cultura, o nitrogênio se destaca, uma vez que exerce grande influência no crescimento vegetativo, expansão da área foliar e na produtividade do milho (Taiz *et al.*, 2017). Para as regiões semiáridas, é extremante importante realizar um manejo adequado desse elemento, pois a restrição hídrica pode contribuir para diminuir a eficiência de absorção e o aproveitamento de adubos nitrogenados (Aragão *et al.*, 2022; Fancelli e Munhoz, 2015).

Nesse cenário, métodos tradicionais de avaliação do estado nutricional e do rendimento das plantas podem ser demorados, destrutivos e exigir maior mão de obra. Como opção, o emprego de veículos aéreos não tripulados (VANTs) e índices de vegetação RGB vem se estabelecendo como uma ferramenta promissora para o acompanhamento da cultura ao longo do ciclo de desenvolvimento.

Estudos recentes indicam que alguns desses índices apresentam associação com a produtividade do milho e estado nutricional de nitrogênio, ainda nos estágios fenológicos vegetativos, como Índice Normalizado de Diferença Verde-Azul (NDGBI), Índice Normalizado de Diferença Vermelho-Azul (NDRBI), Índice visível de resistência atmosférica (VARI) e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Mhaidat *et al.*, 2026; Coswosk *et al.*, 2024; Yao *et al.*, 2024). Resultados como esses permitem chegar a respostas rápidas e com alto nível de confiabilidade, tornando as tomadas de decisões mais assertivas e antecipadas, o que é crucial para o avanço no melhoramento genético do milho.

No entanto, mesmo diante desses avanços, ainda há poucas informações disponíveis na literatura indicando a eficiência de índices de vegetação RGB para avaliar o rendimento do milho em diferentes ambientes de nitrogênio para condições semiáridas. Esse fator dificulta a inclusão de ferramentas em programas de melhoramento como alternativas para auxiliar nas decisões em ambientes com elevada variabilidade climática. Diante disso, o objetivo do trabalho foi identificar índices de vegetação potenciais para o monitoramento do rendimento final do milho sob condições de alto e baixo nitrogênio no semiárido de sergipano.

2 METODOLOGIA

2.1 Localização e material genético

O estudo foi conduzido na Fazenda Experimental da Universidade Federal de Sergipe, situada no município de Nossa Senhora da Glória, Sergipe, nas coordenadas 10°13'06" S e 37° 25'13" O, a 291 m de altitude, durante o ano agrícola de 2024.

Foram avaliados 50 genótipos de milho em delineamento de blocos casualizados (DBC), com esquema de parcelas subdivididas, em três repetições. As parcelas foram constituídas por dois ambientes contrastantes de disponibilidade de nitrogênio: alto nitrogênio (CN), com aplicação de 140 kg ha^{-1} de N em cobertura de forma parcelada, e baixo nitrogênio (SN), sem adubação nitrogenada em cobertura. Foi aplicado 30 kg/há de N em fundação nos dois níveis de N. Os genótipos corresponderam às subparcelas, sendo cada uma composta por duas linhas de três metros de comprimento, espaçadas em 0,70 m entre linhas e 0,20 m entre plantas.

2.2 Fenotipagem de alto rendimento

As imagens foram obtidas com um drone Mavic 2 Pro equipado com sensor RGB de 20 megapixels. O planejamento dos voos foi realizado no aplicativo DroneDeploy, utilizado para delimitação da área experimental de voo, definição da altura e estabelecimento da sobreposição frontal e lateral das imagens (80%).

Foram realizados quatro voos ao longo do ciclo da cultura, à 80 metros de altura, entre os horários de 11h às 13h, sob condições de céu aberto. As datas de obtenção das imagens e os respectivos estágios fenológicos da cultura foram:

- 14/06/202 – V3/V4 (três/quatro folhas completamente expandidas);
- 17/07/2024 – V7/V8 (sete/oito folhas completamente expandidas);
- 31/07/2024 – VT (Pendoamento);
- 21/08/2024 – R1 (Florescimento e polinização).

Para obtenção dos ortomosaicos, foi seguido um fluxo de trabalho que envolveu o alinhamento das imagens, a construção da nuvem de pontos, a geração de textura e do modelo digital de elevação, culminando na criação do ortomosaico, utilizando o software Agisoft Metashape Professional. Os índices de vegetação avaliados foram selecionados com base em sua aplicação (Tabela 1), sendo seus valores extraídos com o pacote FIELDimageR (Matias *et al.*, 2020).

Tabela 1 – Descrição dos índices de vegetação RGB[1] utilizados no estudo.

Nome e abreviação	Equação	Aplicação	Referência
Green Leaf Index (GLI)	(2*G-R-B)/(2*G+R+B)	Diferenciar áreas com e sem vegetação	Louhaichi; Borman; Johnson (2001)
Normalized Green e Red Difference Index (NGRDI)	(G-R)/(G+R)	Detectar o vigor e o teor de clorofila	Tucker (1979)
Triangular greenery index (TGI)	(G-((0.39*R)-(0.69*B)))	Monitoramento da saúde das culturas, estágios de crescimento e detecção de estresse	Hunt *et al.* (2013)
Visible atmospherically resistant index (VARI)	(G-R)/(G+R-B)	Detectar alterações diante do aumento de biomassa e clorofila	Gitelson *et al.* (2002)
Vegetative Index (VEG)	G/R^0.667*B^0.334	Diferenciar culturas agrícolas de plantas daninhas ou solo exposto	Hague, Tillett *et al.* (2006)

[1]Nota: R, G e B correspondem as bandas vermelha, verde e azul, respectivamente, nas equações acima.
Fonte: Autores, 2026.

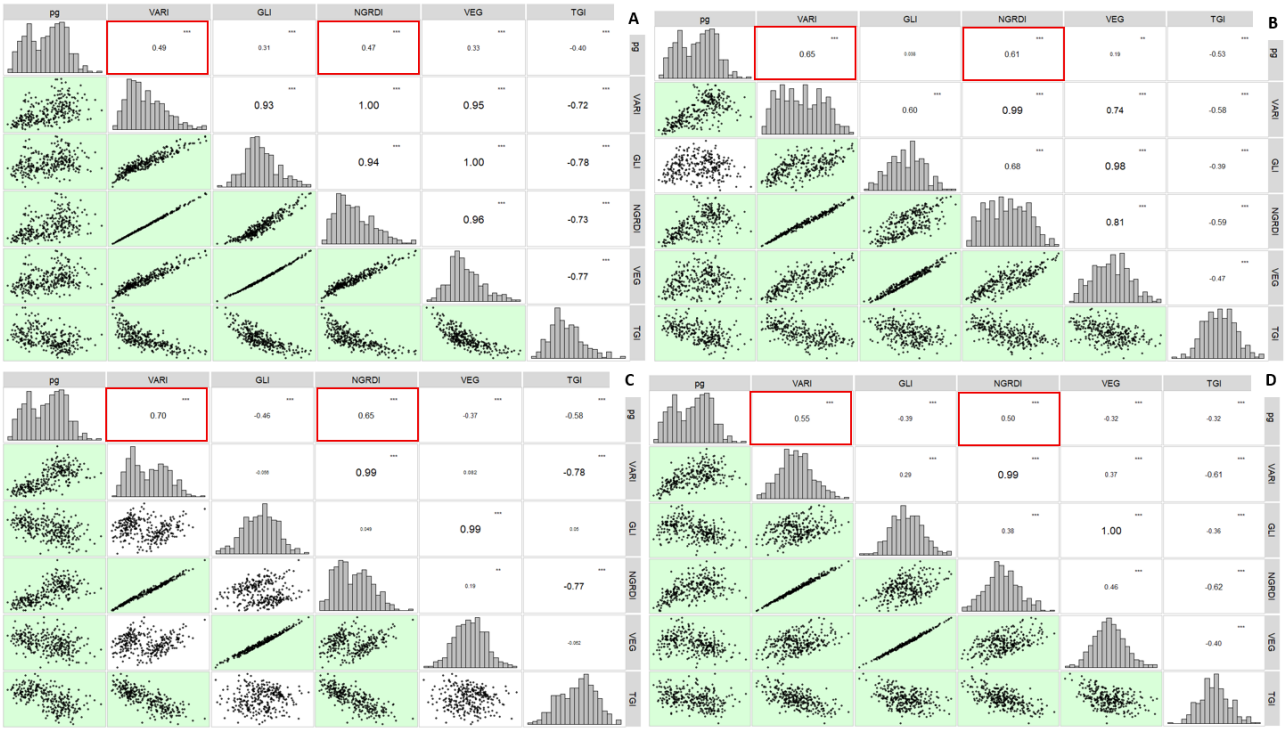
2.3 Análises estatísticas

As análises foram realizadas no software R 4.3.3 (R Core Team, 2024). Inicialmente, foi efetuado uma análise de correlação entre os índices de vegetação e a produtividade de grãos, utilizando o pacote metan (Olivoto; Lúcio, 2020). Em seguida, foi realizada uma análise temporal dos índices de vegetação mais promissores, com o objetivo de avaliar o rendimento da cultura em condições contrastantes de nitrogênio.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de correlação revelou variação temporal na capacidade dos índices de vegetação para explicar o rendimento final do milho. As correlações mais fortes e positivas foram observadas para VARI e NGRDI, destacando-se os voos realizados em 17/07/2024, com valores de 0,65 e 0,61, respectivamente, e em 31/07, com valores de 0,70 e 0,65, respectivamente (Figura 1, B-C). Em contraste, GLI, VEG e TGI apresentaram correlações mais fracas ou inconsistentes com a produtividade.

Figura 1 – Correlações entre os índices com a produtividade em cada voo realizado. A) Voo em 14/06/2024, B) Voo em 17/07/2024, C) Voo em 31/07/2024 e D) Voo em 21/08/2024.



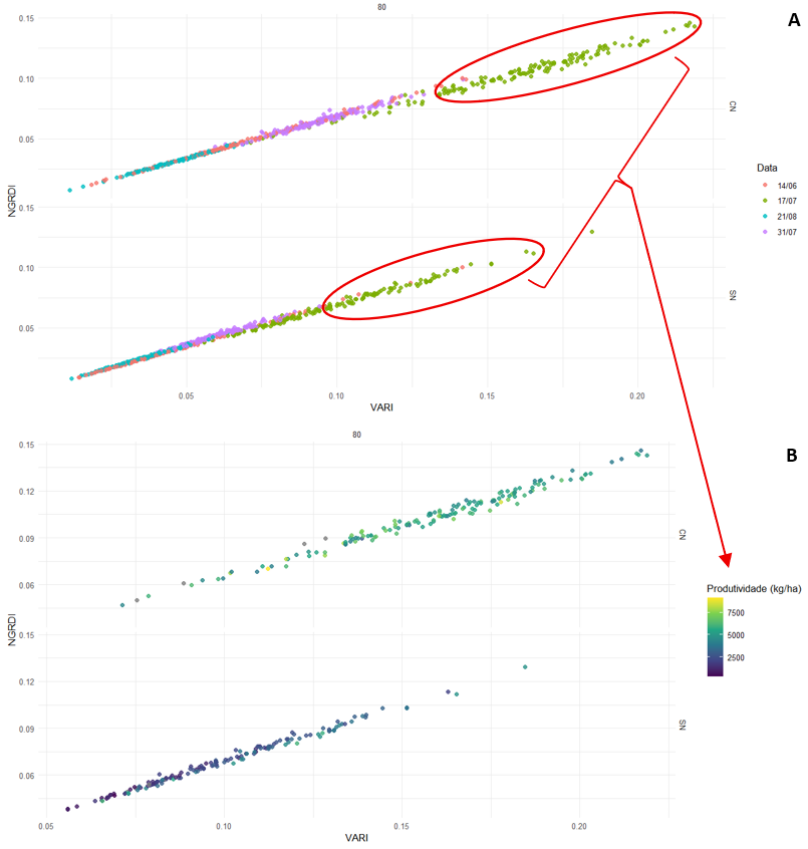
Fonte: Autores, 2026.

Conforme destacado no trabalho de Pereira *et al.*, (2025), esse comportamento demonstra como o estágio de desenvolvimento da cultura impacta na performance dos índices de vegetação. Isso faz sentido, levando em consideração que nos primeiros estágios, as plantas apresentam menor área foliar e maior exposição do solo, consequentemente ocorre diminuição na habilidade dos índices em refletir variações produtivas entre os genótipos (Rodene *et* al., 2022; Yao *et al.*, 2024).

Com o avanço dos estágios vegetativos ocorre crescimento da área foliar, aumento no teor de clorofila e na atividade fotossintética, o que favorece para detecção entre plantas de maior e menor potencial produtivo. No entanto, em estágios que iniciam o processo de senescência foliar, onde as plantas começam a perder a coloração verde das folhas, pode ocorrer saturação de alguns índices de vegetação, diminuindo a sensibilidade para discriminar diferenças associadas ao rendimento ou estado nutricional da cultura (Pereira *et al.*, 2025).

Devido aos maiores coeficientes de correlação identificados, VARI e NGRDI, foram escolhidos para análise temporal e espacial durante o ciclo da cultura. A análise combinada desses índices revelou a formação de grupos diferentes correspondentes aos ambientes de alto nitrogênio (CN) e baixo nitrogênio (SN) (Figura 2 – A). A distinção entre os ambientes ficou mais clara no voo realizado em 17/07/2024, sugerindo que esse período apresentou maior capacidade para diferenciação produtiva avaliada por meio de imagens de drone e índices de vegetação.

Figura 2 – Comportamentos do Índice NGRDI e VARI ao longo do tempo de avaliação. A) Produtividade em cada voo. B) Produtividade no voo 17/07, estágio fenológico V7-V8.



Fonte: Autores, 2026.

Ao analisar especificamente o voo realizado em 17/07/2024, verificou-se que o ambiente de alto nitrogênio (CN) exibiram valores maiores de VARI e NGRDI, além de concentrarem as maiores produtividades (Figura 2 – B). Por outro lado, em condições de baixo nitrogênio (SN) observou-se valores mais baixos dos índices e menor rendimento do milho. Isso sugere que os índices de vegetação foram capazes de identificar as variações nutricionais entre os ambientes ainda no estágio de desenvolvimento da cultura (V7/V8).

A expansão da área foliar e intensa atividade fotossintética, juntamente com maior disponibilidade de nitrogênio favorecem ao acúmulo de biomassa e teor de clorofila as plantas,

características que estão diretamente ligadas ao comportamento dos índices VARI e NGRDI (Gitelson *et al.*, 2002; Tucker 1979).

Esses resultados demonstram como o uso de imagens de drone e índices de vegetação podem ser utilizados para fenotipagem de alto rendimento no monitoramento nutricional e produtivo do milho em regiões semiáridas. A inclusão desse tipo de ferramenta em programas de melhoramento vegetal, pode contribuir para seleção mais rápida de genótipos para avanço ou descarte, uma vez que se torna possível a identificação precoce de variações associadas ao desempenho.

4 CONCLUSÃO

Os índices de vegetação VARI e NGRDI apresentaram maior potencial para o monitoramento da produtividade de grãos no milho sob condições contrastantes de nitrogênio em região semiárida.

Os estágios vegetativos intermediários da cultura permitiram discriminar ambientes de alto e baixo nitrogênio antes da colheita.

Os resultados evidenciam a capacidade de imagens e índices RGB obtidos por drone para identificação produtiva e nutricional do milho.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Sergipe (UFS), ao Grupo de Estudos em Melhoramento Vegetal do Semiárido (GEMS), ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Biodiversidade (PPGAGRI), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

ARAGÃO, M. F.; TAVARES, R.; SANTOS, M. D. F. N. D.; LIMA, J.S.; PINHEIRO NETO, L. G. Nitrogen fertilization split in green corn under rainfed system. **Revista Ceres**, v. 69, p. 668-677, 2022. https://doi.org/10.1590/0034-737X202269060005

COSWOSK, G. G.; GONÇALVES, V. M. L.; DE LIMA, V. J.; DE SOUZA, G. A. R.; TEIXEIRA DO AMARAL JUNIOR, A.; PEREIRA, M. G.; ... & CAMPOSTRINI, E. Utilizing visible band vegetation indices from unmanned aerial vehicle images for maize phenotyping. **Remote sensing**, v. 16, n. 16, p. 3015, 2024. https://doi.org/10.3390/rs16163015

FANCELLI, A. L.; MUNHOZ, R. Programa racional para fertilizantes deve considerar fatores que afetam cultivo. **Visão Agrícola**, v. 13, n. 13, p. 52-57, 2015.

FANCELLI, A. L. Fenologia do milho. **ESALQ**/USP. 1988.

FEITOSA, D. A.; FERREIRA, K. P.; ARAGÃO, N. S.; SANTOS, B. N.; OLIVEIRA, J. D. S.; SILVA, R. D. J.; SANTOS, J. F. S.; BRITO, M. E. B.; JUNIOR, J. J. F. C.; DE OLIVEIRA, G. H. F. Performance of maize hybrids grown in a semi-arid region under rainfed and wastewater irrigation systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 29, e281710, 2025. https://doi.org/10.1590/1807-929/agriambi.v29n5e281710

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; STARK, R., RUNDQUIST, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p. 76-87, 2002. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9

HUNT JUNIOR, E. R.; DORAISWAMY, P. C.; MCMURTREY, J. E.; DAUGHTRY, C. S.; PERRY, E. M.; & AKHMEDOV, B. "A Visible Band Index for Remote Sensing Leaf Chlorophyll Content at the Canopy Scale." **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 21, p. 103–12, 2013. https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.07.020

HAGUE, T.; TILLETT, N. D.; WHEELER, H. Automated crop and weed monitoring in widely spaced cereals. **Precision Agriculture**, v. 7, n. 1, p. 21-32, 2006. https://doi.org/10.1007/s11119-005-6787-1

LOUHAICHI, M.; BORMAN, M.; JOHNSON, D. Spatially located platform and aerial photography for documentation of grazing impacts on wheat. **Geocarto International**, v. 16, n. 1, p. 65-70, 2001. https://doi.org/10.1080/10106040108542184

MATIAS, F. I.; CARAZA-HARTER, M. V.; ENDELMAN, J. B. FIELDimageR: An R package to analyze orthomosaic images from agricultural field trials. **The Plant Phenome Journal**, v. 3, n. 1, p. e20005, 2020. https://doi.org/10.1002/ppj2.20005

MHAIDAT, M.; GONZÁLEZ-PÉREZ, I.; RODRÍGUEZ-PÉREZ, J. R.; VAL-AGUASCA, J. P.; SANZ-ABLANEDO, E. Potential of RGB-Derived Vegetation Indices as an Alternative to NIR-Based Vegetation Indices to Monitor Nitrogen Status in Maize. **Remote Sensing**, v. 18, n. 3, p. 528, 2026. https://doi.org/10.3390/rs18030528

NOGUEIRA, D. B.; DA SILVA, A. O.; GIROLDO, A. B.; DA SILVA, A. P.; COSTA, B. R. Dry spells in a semi-arid region of Brazil and their influence on maize productivity. **Journal of Arid Environments**, v. 209, p. 104892, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104892

OLIVOTO, T.; LÚCIO, A. D. "metan: an R package for multi-environment trial analysis." **Methods in Ecology and Evolution**, v. 11, n. 6, p. 783-789, 2020. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13384

PEREIRA, H. D.; NONATO, J. V. A.; DUARTE, R. C. R. M.; GERHARDT, I. R.; DANTE, R. A.; ARRUDA, P.; YASSITEPE, J. E. D. C. T. Temporal field phenomics of transgenic maize events subjected to drought stress: Cross-validation scenarios and machine learning models. **The Plant Phenome Journal**, v. 8, n. 1, p. e70015, 2025. https://doi.org/10.1002/ppj2.70015

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: https://www.R-project.org/. Acesso em 22 de maio de 2026.

REN, Y.; LI, Q.; DU, X.; ZHANG, Y.; WANG, H.; SHI, G.; WEI, M. Analysis of corn yield prediction potential at various growth phases using a process-based model and deep learning. **Plants**, v. 12, n. 3, p. 446, 2023. https://doi.org/10.3390/plants12030446

RODENE, E.; XU, G.; PALALI DELEN, S.; ZHAO, X.; SMITH, C.; GE, Y.; YANG, J. A UAV-based high-throughput phenotyping approach to assess time-series nitrogen responses and identify trait-associated genetic components in maize. **The Plant Phenome Journal**, v. 5, n. 1, p. e20030, 2022. https://doi.org/10.1002/ppj2.20030

YAO, Y.; YUE, J.; LIU, Y.; YANG, H.; FENG, H.; SHEN, J.; LIU, Q. Classification of maize growth stages based on phenotypic traits and UAV remote sensing. **Agriculture**, v. 14, n. 7, p. 1175, 2024. https://doi.org/10.3390/agriculture14071175

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. p. 731.

CAPÍTULO 21

SENSORIAMENTO REMOTO NA AGRICULTURA DE PRECISÃO: AVANÇOS TECNOLÓGICOS, APLICAÇÕES E INTEGRAÇÃO COM MACHINE LEARNING

Rodes Ângelo Batista da Silva
Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, Brasil

DOI: 10.52832/wed.221.1318



Resumo: O sensoriamento remoto tem desempenhado papel fundamental na agricultura de precisão, permitindo o monitoramento das culturas em diferentes escalas espaciais e temporais por meio de imagens obtidas por satélites, veículos aéreos não tripulados e diversos tipos de sensores. Associada à agricultura digital, essa tecnologia tem sido potencializada pelo uso de algoritmos de aprendizado de máquina aplicados à análise de grandes volumes de dados agrícolas. Realizar uma revisão integrativa da literatura sobre os avanços do sensoriamento remoto na agricultura de precisão, destacando suas principais aplicações e a integração com técnicas de aprendizado de máquina. Foram consultadas as bases Scopus, Web of Science, ScienceDirect e Google Scholar, considerando publicações em português e inglês entre 2020 a 2026. Os estudos analisados evidenciaram aplicações relacionadas ao monitoramento nutricional, detecção de estresses, identificação de pragas e doenças, estimativa de produtividade e mapeamento agrícola. Algoritmos como Random Forest, SVM, XGBoost, CNN, U-Net e DeepLabV3 apresentaram desempenho satisfatório em tarefas de classificação, segmentação e predição. Também foram identificados desafios relacionados à cobertura de nuvens, necessidade de dados rotulados e capacidade de generalização dos modelos. A integração entre sensoriamento remoto e aprendizado de máquina representa uma importante ferramenta para o fortalecimento da agricultura digital, embora ainda existam limitações técnicas e operacionais que demandam novas pesquisas.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Aprendizado de máquina. Machine learning. Sensoriamento remoto. UAVs.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão tem sido crucial na transformação do cenário da produção agrícola, viabilizando o manejo específico das culturas com base nas variações espaciais e temporais dos vários ambientes. Dentro desse cenário, o uso de sensoriamento remoto tornou-se uma das principais tecnologias empregadas para coletar dados agrícolas, permitindo o acompanhamento contínuo das plantações de maneira rápida, não invasiva e com ampla abrangência geográfica. O progresso das tecnologias digitais na agricultura tem impulsionado a criação de sistemas de monitoramento mais eficazes, contribuindo para o aumento da produtividade e para a utilização consciente dos recursos naturais (JOSHI *et al.*, 2023).

Nos últimos anos, o avanço de sensores multiespectrais, hiperespectrais, térmicos e de radar expandiu consideravelmente as opções de uso do sensoriamento remoto na agricultura de precisão. Da mesma forma, a crescente utilização de drones, juntamente com o acesso ampliado a imagens de satélite como Landsat e Sentinel, possibilitou a coleta de informações agrícolas com alta resolução tanto espacial quanto temporal e espectral (SHAHI *et al.*, 2022).

Entre as principais aplicações do sensoriamento remoto na agricultura destacam-se o monitoramento nutricional das plantas, a detecção de estresses hídricos, a identificação precoce de pragas e doenças, o mapeamento de culturas agrícolas e a estimativa de produtividade. Nesse cenário, os índices de vegetação possuem grande relevância, especialmente o Índice de Vegetação

por Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI), amplamente utilizado para avaliação do vigor vegetativo e da atividade fotossintética das culturas agrícolas (Joshi *et al.*, 2023).

O crescente volume de dados gerados por sensores remotos impulsionou a integração do sensoriamento remoto com técnicas de aprendizado de máquina (machine learning) e aprendizado profundo (deep learning). Essas abordagens têm sido amplamente empregadas na análise de imagens agrícolas, permitindo maior precisão na classificação de culturas, segmentação de imagens, detecção automática de padrões e previsão de produtividade agrícola (Falana; Durodola, 2022).

Modelos como Random Forest, Support Vector Machine (SVM), Redes Neurais Convolucionais (Convolutional Neural Networks – CNNs) e arquiteturas de segmentação semântica têm apresentado resultados promissores em aplicações agrícolas, principalmente no processamento de imagens obtidas por drones e satélites (Alibabaei *et al.*, 2022).

Além disso, o uso integrado de sensoriamento remoto, inteligência artificial e sistemas de monitoramento tem contribuído para o avanço da agricultura digital, favorecendo tomadas de decisão mais rápidas e precisas no manejo agrícola. Entretanto, ainda existem desafios relacionados ao processamento de grandes volumes de dados, à necessidade de dados rotulados para treinamento de modelos inteligentes, à variabilidade atmosférica das imagens e ao elevado custo computacional de algumas técnicas avançadas (Bassine *et al.*, 2023). Diante disso, o objetivo deste trabalho é realizar uma revisão integrativa da literatura sobre os avanços do sensoriamento remoto na agricultura de precisão, destacando suas principais aplicações e a integração com técnicas de aprendizado de máquina.

2 METODOLOGIA

Este estudo consistiu em uma revisão integrativa da literatura, com abordagem qualitativa e caráter descritivo, visando reunir e analisar os avanços do sensoriamento remoto aplicado à agricultura de precisão e sua integração com técnicas de aprendizado de máquina.

As buscas bibliográficas foram realizadas em maio de 2026 nas bases de dados Scopus, Web of Science, ScienceDirect e Google Scholar. Foram utilizadas combinações dos descritores em inglês "remote sensing" AND agriculture, "precision agriculture" AND machine learning, "UAV" AND crop monitoring, "deep learning" AND agriculture e "semantic segmentation" AND remote sensing. Também foram considerados termos equivalentes em português. As estratégias de busca foram aplicadas utilizando operadores booleanos para ampliar a recuperação dos estudos.

Foram incluídos artigos científicos completos publicados em português e inglês no período de 2017 a 2026, abrangendo estudos experimentais e artigos de revisão relacionados à aplicação do

sensoriamento remoto na agricultura. Foram excluídos trabalhos duplicados, resumos expandidos, documentos sem texto completo disponível e estudos que não apresentavam aplicações agrícolas ou informações suficientes para análise.

Inicialmente, foram identificados 287 trabalhos. Após a remoção de 43 registros duplicados e a análise de títulos e resumos, 67 artigos foram selecionados para leitura na íntegra, dos quais 38 atenderam aos critérios estabelecidos e compuseram a revisão. Os dados extraídos dos estudos selecionados foram submetidos à análise qualitativa e comparativa, considerando as culturas avaliadas, os sensores e plataformas utilizados, os algoritmos empregados, as métricas de desempenho reportadas, bem como as vantagens, limitações e potencial de generalização das diferentes abordagens.

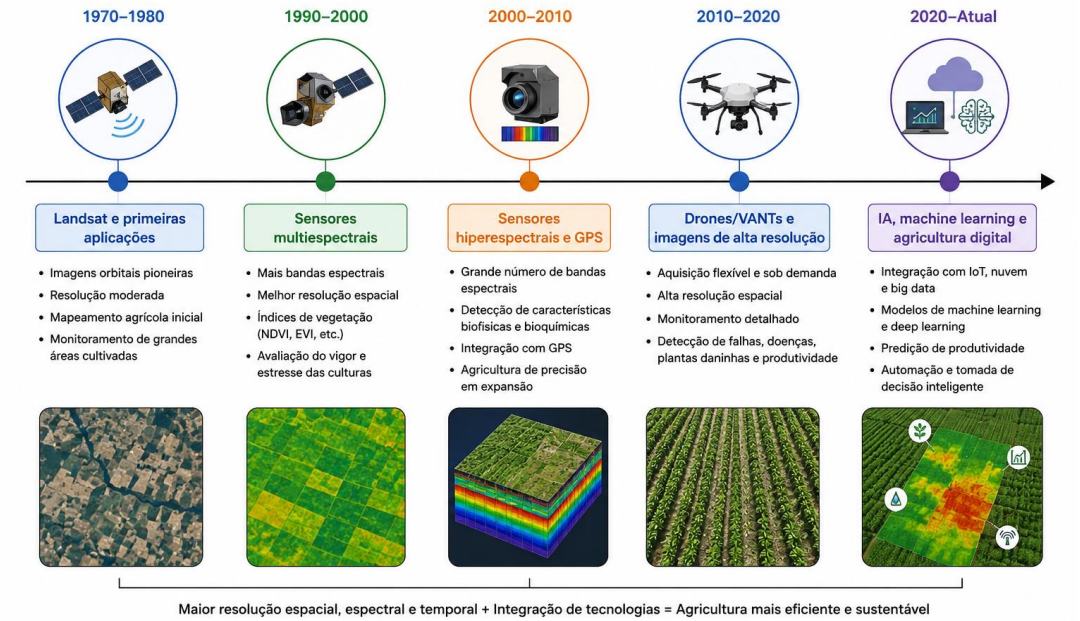
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Evolução do sensoriamento remoto na agricultura

O sensoriamento remoto aplicado à agricultura passou por uma intensa evolução tecnológica nas últimas décadas, tornando-se uma das principais ferramentas da agricultura de precisão. As primeiras aplicações agrícolas ocorreram a partir do uso de imagens orbitais do programa Landsat, lançado na década de 1970, permitindo o monitoramento de áreas cultivadas, identificação de padrões de uso do solo e acompanhamento da dinâmica da vegetação em escala regional. Os sensores Landsat representaram um marco para o monitoramento agrícola devido à disponibilidade contínua de imagens multitemporais e ao avanço das análises espectrais aplicadas às culturas agrícolas (Jiang; Li; Feng, 2022).

Com o avanço das tecnologias de imageamento, os sensores multiespectrais passaram a apresentar maior resolução espacial e espectral, ampliando as possibilidades de aplicação na agricultura de precisão. Esses sensores permitiram o desenvolvimento de índices de vegetação capazes de avaliar vigor vegetativo, estresse hídrico e variabilidade nutricional das culturas. Posteriormente, o surgimento dos sensores hiperespectrais promoveu uma nova etapa no sensoriamento remoto agrícola, permitindo a obtenção de centenas de bandas espectrais estreitas e contínuas, capazes de identificar alterações fisiológicas mais sutis nas plantas (Adão *et al.*, 2017) (Figura 1).

Figura 1 – Evolução do sensoriamento remoto aplicado à agricultura



Fonte: Elaborada pelo autor com auxílio de inteligência artificial (ChatGPT/DALL·E, OpenAI, 2026).

Além da evolução dos sensores, houve avanços significativos nas plataformas de aquisição de dados. Os veículos aéreos não tripulados (*Unmanned Aerial Vehicles* – UAVs), também conhecidos como drones ou VANTs, passaram a desempenhar papel fundamental no monitoramento agrícola devido à elevada resolução espacial das imagens, flexibilidade operacional e menor custo em comparação aos sistemas tradicionais de aquisição aérea. O uso de UAVs possibilitou aplicações mais detalhadas no monitoramento nutricional, detecção de falhas de plantio, identificação de doenças e estimativa de produtividade agrícola (Lyu *et al.*, 2022).

Paralelamente, o aumento da disponibilidade de imagens de alta resolução espacial provenientes de satélites como Sentinel-2, WorldView e PlanetScope contribuiu para análises mais precisas da variabilidade espacial das lavouras. A integração entre sensores ópticos, térmicos, radar e sistemas de posicionamento geográfico permitiu maior precisão no manejo localizado das culturas, favorecendo tomadas de decisão mais eficientes no campo (Jurado *et al.*, 2022).

Atualmente, o sensoriamento remoto está diretamente associado ao conceito de agricultura digital, caracterizado pela integração entre sensores, internet das coisas (*Internet of Things* – IoT), computação em nuvem e técnicas de aprendizado de máquina. Nesse cenário, grandes volumes de dados agrícolas podem ser processados em tempo real, permitindo automatização de análises, predição de produtividade e suporte à tomada de decisão agrícola. Além disso, modelos de *machine learning* e *deep learning* vêm sendo amplamente utilizados na classificação de culturas, segmentação de imagens e monitoramento agrícola de alta precisão, consolidando o sensoriamento remoto

como uma das principais bases tecnológicas da agricultura inteligente (Shahi *et al.*, 2022; Joshi *et al.*, 2023).

Apesar dos avanços observados, a escolha da plataforma depende da resolução requerida, dos custos envolvidos e das condições ambientais. Enquanto satélites apresentam maior cobertura espacial, drones oferecem elevada resolução espacial, porém com menor área de abrangência e maior demanda operacional.

3.2 Comparação entre estudos experimentais

Os estudos analisados evidenciam a ampla utilização de diferentes plataformas, sensores e algoritmos de aprendizado de máquina em aplicações agrícolas. Segundo Shahi et al. (2022), imagens obtidas por veículos aéreos não tripulados (UAVs), associadas a algoritmos como Random Forest e Support Vector Machine (SVM), têm sido empregadas com sucesso na classificação de culturas e no monitoramento agrícola. De maneira semelhante, Bassine *et al.* (2023) destacaram o uso do algoritmo Extreme Gradient Boosting (XGBoost) em aplicações voltadas à estimativa de produtividade e previsão de safras, especialmente quando integrado a dados espectrais e meteorológicos.

Além disso, Yu *et al.* (2023) relataram o crescente emprego de Redes Neurais Convolucionais (CNNs) na classificação e reconhecimento de imagens ao longo do ciclo de desenvolvimento das culturas. No contexto da segmentação semântica, Lv *et al.* (2023) destacaram o desempenho de arquiteturas como U-Net e DeepLabV3 em tarefas relacionadas ao mapeamento agrícola e à delimitação de áreas cultivadas. De acordo com Alami Machichi *et al.* (2023), os modelos de aprendizado profundo têm ampliado as possibilidades de classificação e mapeamento de culturas agrícolas, favorecendo a obtenção de informações mais detalhadas sobre a variabilidade espacial das lavouras.

De modo geral, os resultados demonstram que a escolha da plataforma de aquisição, do tipo de sensor e do algoritmo empregado influencia diretamente o desempenho das aplicações agrícolas. Enquanto os UAVs oferecem elevada resolução espacial e maior detalhamento das imagens, satélites como Sentinel-2 proporcionam maior cobertura espacial e frequência de revisita. Da mesma forma, algoritmos tradicionais, como Random Forest e XGBoost, destacam-se pela robustez e menor custo computacional, ao passo que arquiteturas de aprendizado profundo, como U-Net e DeepLabV3, apresentam maior capacidade de extração automática de características e melhor desempenho em tarefas complexas de segmentação. Entretanto, a eficiência desses métodos pode variar em função da cultura estudada, da resolução das imagens, da disponibilidade

de dados rotulados e das condições ambientais, evidenciando a necessidade de validação em diferentes cenários agrícolas.

3.3 Integração com aprendizado de máquina

O avanço das técnicas de aprendizado de máquina (machine learning) e aprendizado profundo (deep learning) tem ampliado significativamente o potencial do sensoriamento remoto aplicado à agricultura de precisão. O grande volume de dados gerados por satélites, sensores hiperespectrais e veículos aéreos não tripulados (Unmanned Aerial Vehicles – UAVs) impulsionou o desenvolvimento de modelos computacionais capazes de realizar análises automatizadas, classificação de culturas, segmentação de imagens e predição de produtividade agrícola com elevada precisão (Zualkerman *et al.*, 2023).

Entre os principais algoritmos de aprendizado de máquina utilizados na agricultura destacam-se o Random Forest e o Support Vector Machine (SVM). O algoritmo Random Forest é amplamente empregado em tarefas de classificação de culturas agrícolas devido à sua capacidade de lidar com grandes conjuntos de dados e reduzir problemas de sobreajuste (overfitting). Já o SVM apresenta bom desempenho na separação de classes complexas em imagens multiespectrais e hiperespectrais, sendo frequentemente utilizado em mapeamento agrícola e identificação de padrões espectrais (Shahi *et al.*, 2022).

Outro método amplamente utilizado é o Extreme Gradient Boosting (XGBoost), algoritmo baseado em árvores de decisão que apresenta elevada eficiência computacional e alta capacidade preditiva. O XGBoost tem sido aplicado na estimativa de produtividade agrícola, previsão de safras e análise de variabilidade espacial das culturas, especialmente quando associado a dados espectrais e meteorológicos (Bassine *et al.*, 2023).

Nos últimos anos, os modelos de deep learning passaram a apresentar destaque nas aplicações agrícolas devido à sua elevada capacidade de extração automática de características em imagens de sensoriamento remoto. As Redes Neurais Convolucionais (Convolutional Neural Networks – CNNs) são amplamente utilizadas em tarefas de classificação de imagens agrícolas, permitindo identificar padrões complexos relacionados ao desenvolvimento das culturas, estresse vegetal, doenças e produtividade (YU *et al.*, 2023).

Além da classificação, técnicas de segmentação semântica vêm sendo amplamente utilizadas no processamento de imagens agrícolas de alta resolução. Nesse contexto, arquiteturas como U-Net e DeepLabV3 têm apresentado resultados promissores na delimitação automática de áreas agrícolas, identificação de culturas e mapeamento de uso e cobertura do solo. O modelo U-Net destaca-se pela eficiência na segmentação pixel a pixel, especialmente em conjuntos de dados

agrícolas com quantidade limitada de amostras rotuladas. Já o DeepLabV3 utiliza convoluções dilatadas e mecanismos avançados de extração multiescalar, proporcionando maior precisão na segmentação de imagens complexas (LV *et al.*, 2023).

As aplicações do aprendizado de máquina no sensoriamento remoto agrícola podem ser agrupadas em três principais categorias: classificação, segmentação e predição. A classificação é utilizada na identificação de culturas agrícolas, tipos de cobertura vegetal e detecção de doenças. A segmentação semântica permite delimitar regiões específicas em imagens agrícolas, favorecendo o monitoramento detalhado das lavouras. Já os modelos preditivos são empregados na estimativa de produtividade, previsão de safras e monitoramento de variáveis agronômicas ao longo do ciclo das culturas (Alami-Machichi *et al.*, 2023).

Apesar dos avanços recentes, ainda existem desafios relacionados à necessidade de grandes volumes de dados rotulados, elevado custo computacional e dificuldade de generalização dos modelos em diferentes condições ambientais. Entretanto, a integração entre sensoriamento remoto e inteligência artificial tende a desempenhar papel cada vez mais importante no desenvolvimento da agricultura digital e de sistemas agrícolas mais eficientes e sustentáveis.

3.4 Limitações e desafios

Apesar dos avanços observados, ainda existem desafios relacionados à cobertura de nuvens em sensores ópticos, necessidade de correção atmosférica, calibração radiométrica e validação em campo. Além disso, a disponibilidade limitada de dados rotulados, o elevado custo computacional de alguns modelos de aprendizado profundo e a dificuldade de generalização para diferentes culturas e regiões constituem limitações importantes. Aspectos relacionados à interpretabilidade dos modelos e à acessibilidade dessas tecnologias para pequenos produtores também representam desafios para a ampla adoção da agricultura digital (Bassine *et al.*, 2023; Joshi *et al.*, 2023).

4 CONCLUSÃO

Os estudos analisados evidenciaram que a integração entre sensoriamento remoto e técnicas de aprendizado de máquina tem ampliado as possibilidades de monitoramento agrícola, classificação de culturas e estimativa de produtividade. Entretanto, desafios relacionados à cobertura de nuvens, necessidade de dados rotulados, custo computacional e capacidade de generalização dos modelos ainda limitam sua aplicação em diferentes cenários. Nesse contexto, pesquisas futuras devem concentrar-se no desenvolvimento de modelos mais robustos, interpretáveis e acessíveis, favorecendo a expansão da agricultura digital e o uso sustentável dos recursos agrícolas.

REFERÊNCIAS

ADÃO, T.; HRUŠKA, J.; PÁDUA, L.; BESSA, J.; PERES, E.; MORAIS, R.; SOUSA, J. J. Hyperspectral imaging: a review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry. **Remote Sensing**, Basel, v. 9, n. 11, p. 1110, 2017. DOI: 10.3390/rs9111110.

ALAMI MACHICHI, M.; EL MANSOURI, L.; IMANI, Y.; BOURJA, O.; LAHLOU, O.; ZENNAYI, Y.; BOURZEIX, F.; HOUMMA, I. H.; HADRI, R. Crop mapping using supervised machine learning and deep learning: a systematic literature review. **International Journal of Remote Sensing,** Abingdon, v. 44, n. 8, p. 2717-2753, 2023. DOI: 10.1080/01431161.2023.2190953.

ALIBABAEI, K.; GASPAR, P. D.; LIMA, T. M.; CAMPOS, R. M.; GIRÃO, I.; MONTEIRO, J.; LOPES, C. M. A review of the challenges of using deep learning algorithms to support decision-making in agricultural activities. **Remote Sensing**, Basel, v. 14, n. 3, p. 638, 2022. DOI: 10.3390/rs14030638.

BASSINE, F. Z.; EPULE, T. E.; KECHCHOUR, A.; CHEHBOUNI, A. Recent applications of machine learning, remote sensing, and IoT approaches in yield prediction: a critical review. **arXiv**, Ithaca, 2023. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2306.04566. Acesso em: 20 maio 2026.

FALANA, O. B.; DURODOLA, O. I. Multimodal remote sensing and machine learning for precision agriculture: a review. **Journal of Engineering Research and Reports**, v. 23, n. 8, p. 30-34, 2022. DOI: 10.9734/JERR/2022/v23i8759.

JIANG, N.; LI, P.; FENG, Z. Remote sensing of swidden agriculture in the tropics: a review. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdam, v. 112, p. 102876, 2022. DOI: 10.1016/j.jag.2022.102876.

JOSHI, A.; PRADHAN, B.; GITE, S.; CHAKRABORTY, S. Remote-sensing data and deep-learning techniques in crop mapping and yield prediction: a systematic review. **Remote Sensing**, Basel, v. 15, n. 8, p. 2014, 2023. DOI: 10.3390/rs15082014.

JURADO, J. M.; LOPEZ, A.; PÁDUA, L.; SOUSA, J. J. Remote sensing image fusion on 3D scenarios: a review of applications for agriculture and forestry. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdam, v. 112, p. 102856, 2022. DOI: 10.1016/j.jag.2022.102856.

LV, J.; SHEN, Q.; LV, M.; LI, Y.; SHI, L.; ZHANG, P. Deep learning-based semantic segmentation of remote sensing images: a review. **Frontiers in Ecology and Evolution**, Lausanne, v. 11, p. 1201125, 2023. DOI: 10.3389/fevo.2023.1201125.

LYU, X.; LI, X.; DANG, D.; DOU, H.; WANG, K.; LOU, A. Unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing in grassland ecosystem monitoring: a systematic review. **Remote Sensing**, Basel, v. 14, n. 5, p. 1096, 2022. DOI: 10.3390/rs14051096.

SHAHI, T. B.; XU, C.; NEUPANE, A.; GUO, W. Machine learning methods for precision agriculture with UAV imagery: a review. **Electronic Research Archive**, Springfield, v. 30, n. 12, p. 4277-4317, 2022. DOI: 10.3934/era.2022218.

YU, F.; ZHANG, Q.; XIAO, J.; MA, Y.; WANG, M.; LUAN, R.; LIU, X.; PING, Y.; NIE, Y.; TAO, Z.; ZHANG, H. Progress in the application of CNN-based image classification and recognition in whole crop growth cycles. **Remote Sensing**, Basel, v. 15, n. 12, p. 2988, 2023. DOI: 10.3390/rs15122988.

ZUALKERNAN, I.; ABUHANI, D. A.; HUSSAIN, M. H.; KHAN, J.; ELMOHANDES, M. Machine learning for precision agriculture using imagery from unmanned aerial vehicles (UAVs): a survey. **Drones**, Basel, v. 7, n. 6, p. 382, 2023. DOI: 10.3390/drones7060382.

PARTE VII — RECURSOS GENÉTICOS, BIODIVERSIDADE E ADAPTAÇÃO CLIMÁTICA

CAPÍTULO 22

RECURSOS GENÉTICOS DO CACAUEIRO E ADAPTAÇÃO CLIMÁTICA: O PAPEL ESTRATÉGICO DO BANCO ATIVO DE GERMOPLASMA DA CEPLAC NA CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE AGRÍCOLA

Andrielle Leal da Silva
Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento – MAPA/Mestranda em Gestão dos Recursos Hídricos e Desenvolvimento Local na Amazônia da Universidade Federal do Pará – UFPA, Brasil

Loarena Leal Cruz
Analista Ambiental na Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Clima e Sustentabilidade – SEMAS, Brasil

DOI: 10.52832/wed.221.1319



Resumo: As mudanças climáticas e a erosão genética representam desafios crescentes para a sustentabilidade da agricultura e para a segurança alimentar global. Nesse contexto, a conservação dos recursos genéticos vegetais torna-se essencial para garantir a disponibilidade de características adaptativas capazes de contribuir para a resiliência dos sistemas produtivos. O presente estudo teve como objetivo analisar a importância dos recursos genéticos do cacaueiro (*Theobroma cacao* L.) conservados no Banco Ativo de Germoplasma (BAG) da Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC) como estratégia de preservação da biodiversidade agrícola e adaptação climática. A pesquisa caracteriza-se como uma revisão bibliográfica e documental de abordagem qualitativa, fundamentada em artigos científicos, documentos institucionais e publicações técnicas produzidas preferencialmente entre 2015 e 2023. Os resultados evidenciam que o BAG da CEPLAC conserva mais de 53 mil plantas representando aproximadamente 2.200 genótipos distintos, constituindo uma das maiores coleções de recursos genéticos de cacau do mundo. O Catálogo de Descritores do BAG possibilita a caracterização morfológica, agronômica, fitossanitária e molecular dos acessos, subsidiando programas de melhoramento genético voltados à produtividade, resistência a doenças e adaptação climática. Conclui-se que a conservação dos recursos genéticos do cacaueiro desempenha papel estratégico para a manutenção da biodiversidade agrícola, para a inovação científica e para o desenvolvimento de sistemas produtivos mais resilientes às mudanças climáticas.

Palavras-chave: Agrobiodiversidade. Conservação Genética. Recursos Fitogenéticos. Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A biodiversidade agrícola constitui um componente fundamental para a segurança alimentar, a sustentabilidade dos sistemas produtivos e a adaptação da agricultura às mudanças ambientais. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura – FAO (2019), os recursos genéticos vegetais representam a base biológica utilizada no desenvolvimento de cultivares mais produtivas, resistentes a doenças e tolerantes aos estresses climáticos. A conservação desses recursos é considerada uma estratégia prioritária em escala global, uma vez que a redução da diversidade genética compromete a capacidade dos sistemas agrícolas de responder aos desafios decorrentes das mudanças climáticas, da emergência de novas doenças e da crescente demanda por alimentos.

Entre as culturas de relevância econômica mundial, o cacaueiro (*Theobroma cacao* L.) destaca-se por sua importância social, econômica e ambiental, especialmente em regiões tropicais. Além de constituir a principal matéria-prima da indústria do chocolate, seu cultivo representa fonte de renda para milhões de agricultores familiares e pode contribuir para a conservação ambiental quando associado a sistemas agroflorestais. A Amazônia é reconhecida como um dos principais centros de diversidade genética da espécie, abrigando recursos genéticos de elevado valor para programas de conservação e melhoramento vegetal (Lavoie; Thomas; Olivier, 2023).

Nas últimas décadas, a agricultura tem enfrentado desafios crescentes decorrentes das mudanças climáticas. O aumento das temperaturas médias globais, as alterações nos regimes de precipitação e a maior frequência de eventos climáticos extremos têm impactado diretamente a produtividade agrícola. No caso da cacauicultura, essas mudanças podem comprometer o crescimento das plantas, a produção e a qualidade das amêndoas, tornando indispensável o desenvolvimento e a seleção de materiais genéticos mais adaptados às novas condições ambientais (Lahive *et al*., 2021).

Paralelamente, a erosão genética provocada pela substituição de variedades tradicionais por materiais comerciais, pela degradação dos ecossistemas naturais e pela expansão das fronteiras agrícolas tem reduzido a diversidade disponível para futuras pesquisas e programas de melhoramento. Essa realidade reforça a necessidade de estratégias eficazes de conservação dos recursos fitogenéticos, especialmente em espécies de elevada importância econômica e ecológica, como o cacaueiro (FAO, 2019).

Neste contexto, os bancos de germoplasma assumem papel estratégico ao conservar materiais genéticos que podem ser utilizados para enfrentar desafios produtivos futuros. Essas coleções funcionam como reservatórios de diversidade genética, permite a preservação, caracterização e utilização de genótipos com características de interesse agronômico, como resistência a doenças, tolerância ao déficit hídrico, qualidade das amêndoas e adaptação climática (Global Network for Cacao Genetic Resources [CacaoNet], 2021).

No Brasil, a Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC) mantém uma das mais importantes coleções de recursos genéticos de cacau do mundo. O Banco Ativo de Germoplasma (BAG), localizado em Marituba, no estado do Pará, conserva mais de 53 mil plantas correspondentes a aproximadamente 2.200 genótipos distintos de *Theobroma cacao* e espécies relacionadas. Essa coleção constitui um patrimônio estratégico para a pesquisa científica, a conservação da biodiversidade agrícola e o desenvolvimento de novas variedades adaptadas às demandas atuais e futuras da cacauicultura (Brasil, 2022a). Diante desse cenário, emerge a seguinte questão de pesquisa: como a conservação dos recursos genéticos do cacaueiro mantidos no Banco Ativo de Germoplasma da CEPLAC contribui para a preservação da biodiversidade agrícola e para a adaptação da cacauicultura às mudanças climáticas?

A justificativa deste estudo fundamenta-se na necessidade de compreender a importância dos recursos genéticos como instrumentos de conservação da agrobiodiversidade e de fortalecimento da resiliência dos sistemas produtivos frente às transformações ambientais globais. Além disso, a pesquisa contribui para ampliar a discussão sobre o papel estratégico dos bancos de

germoplasma na geração de conhecimento científico, no desenvolvimento de cultivares adaptadas e na promoção da sustentabilidade da cadeia produtiva do cacau.

Dessa forma, o objetivo deste estudo é analisar a importância da conservação dos recursos genéticos do cacaueiro mantidos no Banco Ativo de Germoplasma da CEPLAC como estratégia de preservação da biodiversidade agrícola e adaptação climática, a partir de um estudo de revisão bibliográfica e documental, destacando sua contribuição para a pesquisa científica, para o melhoramento genético e para a sustentabilidade da cacauicultura brasileira.

2 METODOLOGIA

A pesquisa caracteriza-se como uma revisão bibliográfica e documental de natureza qualitativa e caráter descritivo, desenvolvida com o objetivo de compreender a importância da conservação dos recursos genéticos do cacaueiro (*Theobroma cacao* L.) para a preservação da biodiversidade agrícola e para a adaptação às mudanças climáticas.

As fontes consultadas incluíram publicações da FAO, CEPLAC, Ministério da Agricultura e Pecuária, CacaoNet e artigos científicos indexados em bases nacionais e internacionais. Foram incluídas publicações científicas, documentos técnicos e institucionais relacionados à conservação dos recursos genéticos do cacaueiro, biodiversidade agrícola, bancos de germoplasma e adaptação climática, publicados preferencialmente entre 2015 e 2023 e disponíveis integralmente para consulta. Foram excluídos trabalhos duplicados, documentos sem relação direta com o tema, materiais sem respaldo científico ou institucional e publicações com informações insuficientes.

As informações selecionadas foram organizadas por análise temática em quatro eixos: conservação da biodiversidade agrícola, recursos genéticos do cacaueiro, Banco Ativo de Germoplasma da CEPLAC e adaptação climática. A partir desses eixos, procedeu-se à interpretação e discussão dos dados, buscando identificar as contribuições dos recursos genéticos do cacaueiro para a sustentabilidade da produção, a conservação da agrobiodiversidade e o enfrentamento dos desafios climáticos contemporâneos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização das fontes analisadas

A busca bibliográfica e documental resultou na seleção de oito publicações centrais, entre artigos científicos, documentos técnicos e relatórios institucionais diretamente relacionados aos objetivos da pesquisa. De modo geral, os estudos convergem ao reconhecer a conservação genética como um elemento estratégico para a sustentabilidade da agricultura e o fortalecimento da resiliência dos sistemas produtivos. Os documentos da CEPLAC e do Ministério da Agricultura

destacam a importância do Banco Ativo de Germoplasma de Cacau como uma das maiores coleções genéticas da espécie no mundo, evidenciando sua contribuição para a pesquisa científica e o melhoramento vegetal. Por sua vez, trabalhos como os de Lahive et al. (2021) e Lavoie, Thomas e Olivier (2023) demonstram que a diversidade genética do cacaueiro é fundamental para a seleção de materiais mais resistentes a doenças e mais adaptados aos impactos das mudanças climáticas. Complementarmente, a FAO (2019) e a CacaoNet (2021) ressaltam que a conservação dos recursos fitogenéticos desempenha papel essencial na manutenção da biodiversidade agrícola, na segurança alimentar e na capacidade adaptativa da agricultura frente aos desafios ambientais contemporâneos.

3.2 Conservação dos recursos genéticos e biodiversidade agrícola

A conservação dos recursos genéticos é reconhecida internacionalmente como uma estratégia essencial para garantir a sustentabilidade da agricultura e ampliar a capacidade adaptativa das culturas frente às mudanças climáticas (FAO, 2019). No caso do cacaueiro, essa importância é ampliada pela elevada diversidade genética encontrada na Amazônia, considerada um dos principais centros de origem e diversificação da espécie (Lavoie; Thomas; Olivier, 2023). Essa variabilidade genética fornece características adaptativas essenciais para enfrentar desafios produtivos, ambientais e sanitários da cacauicultura.

O Banco Ativo de Germoplasma (BAG) da CEPLAC constitui uma das mais importantes iniciativas de conservação genética do país. A coleção reúne mais de 53 mil plantas vivas e cerca de 2.200 genótipos distintos, preservando materiais obtidos em expedições científicas realizadas principalmente na Amazônia brasileira (Brasil, 2022a). Essa diversidade representa uma fonte estratégica de características relacionadas à produtividade, qualidade das amêndoas, resistência a doenças e adaptação ambiental. A ampla representatividade genética da coleção reduz os riscos de erosão genética e assegura materiais de interesse para pesquisas e programas de melhoramento. (Faleiro; Junqueira; Braga, 2007).

Tabela 1 – Características do Banco Ativo de Germoplasma de Cacau da CEPLAC.

Indicador	Informação
Plantas conservadas	Mais de 53.000
Genótipos distintos	Aproximadamente 2.200
Localização	Marituba (PA)
Finalidade	Conservação, pesquisa e melhoramento
Relevância	Uma das maiores coleções de cacau do mundo

Fonte: Adaptado de Brasil (2022a).

A importância do BAG da CEPLAC vai além da conservação física dos acessos. O banco atua como uma plataforma científica voltada à geração de conhecimento sobre a diversidade genética do cacaueiro, subsidiando pesquisas em áreas como genética, fitopatologia, fisiologia vegetal, adaptação climática e desenvolvimento de cultivares mais eficientes (Faleiro; Queiroz; Lopes, 2008). Os materiais conservados permitem identificar genes associados a características de interesse agronômico, contribuindo para o desenvolvimento de cultivares mais eficientes e adaptadas às necessidades dos produtores.

Nesse contexto, destaca-se o papel do Catálogo de Descritores do Banco Ativo de Germoplasma, ferramenta que organiza e sistematiza informações sobre características morfológicas, florais, agronômicas, fitossanitárias e moleculares dos acessos conservados (Brasil, 2022b). Os descritores padronizados permitem comparar acessos e identificar características de interesse, como produtividade, compatibilidade genética e resistência a doenças. (Brasil, 2022d).

Os descritores agronômicos e fitossanitários apresentam especial relevância para a adaptação climática, pois permitem selecionar materiais resistentes à vassoura-de-bruxa (*Moniliophthora perniciosa* (Stahel) Aime & Philips-Mora), à podridão-parda (*Phytophthora spp.*) e a condições ambientais adversas. A utilização desses recursos genéticos foi fundamental para a recuperação da cacauicultura brasileira após a crise provocada pela vassoura-de-bruxa, doença que provocou severas perdas econômicas na região produtora da Bahia durante a década de 1990 (Brasil, 2022c). A experiência demonstrou que a diversidade genética conservada em bancos de germoplasma pode representar um recurso estratégico para enfrentar emergências fitossanitárias e garantir a continuidade da produção agrícola.

Além da resistência a doenças, a diversidade genética do cacaueiro apresenta papel central na adaptação às mudanças climáticas (Pires; Monteiro; Pinto, 2012). Estudos recentes demonstram que diferentes genótipos respondem de maneira distinta às alterações ambientais. Lahive *et al.* (2021) verificaram que alguns materiais apresentam maior tolerância ao estresse hídrico e ao aumento da concentração atmosférica de dióxido de carbono, mantendo níveis satisfatórios de crescimento e produtividade mesmo sob condições adversas. Esses resultados reforçam a importância da conservação genética como ferramenta para a construção de sistemas agrícolas resilientes.

A literatura científica aponta que os impactos das mudanças climáticas poderão alterar significativamente as áreas aptas ao cultivo do cacau nas próximas décadas. O aumento da temperatura média, as mudanças nos padrões de precipitação e a maior frequência de eventos extremos podem afetar o desenvolvimento das plantas, a incidência de doenças e a produtividade das lavouras (Lahive *et al.*, 2021). Diante desse cenário, a disponibilidade de uma ampla base

genética torna-se indispensável para o desenvolvimento de materiais capazes de suportar essas novas condições ambientais (Dwivedi *et al.*, 2016).

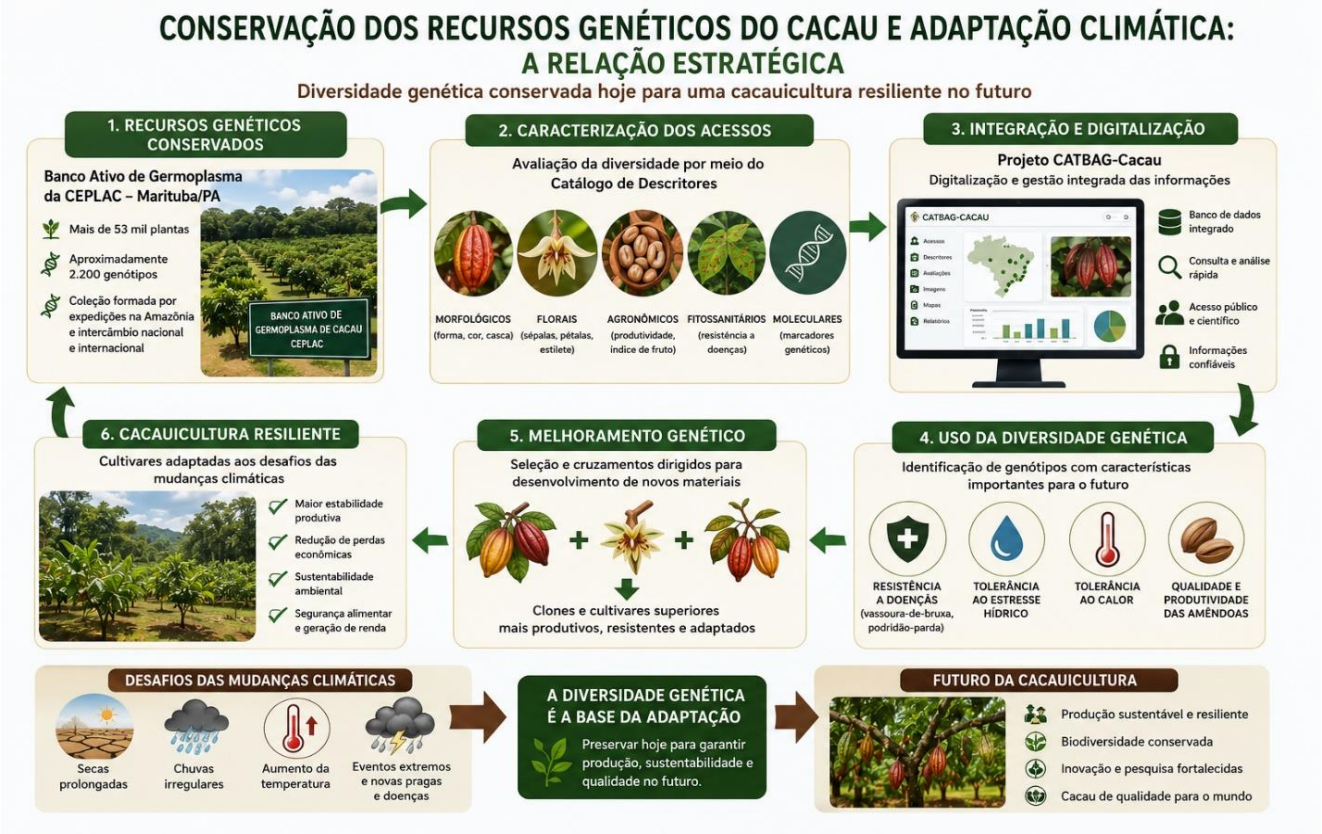
Outro aspecto relevante identificado nesta pesquisa refere-se à contribuição dos recursos genéticos para a conservação da biodiversidade agrícola. Segundo a FAO (2019), a manutenção da diversidade genética das espécies cultivadas fortalece a segurança alimentar e reduz a vulnerabilidade dos sistemas produtivos frente a ameaças ambientais e econômicas. No caso do cacaueiro, a conservação de diferentes grupos genéticos permite preservar características únicas que poderão ser utilizadas tanto na agricultura convencional quanto em sistemas agroflorestais sustentáveis, ampliando as possibilidades de inovação tecnológica e de adaptação produtiva.

Paralelamente, iniciativas de modernização da gestão genética têm ampliado o potencial de utilização dos recursos conservados. O projeto CATBAG-Cacau representa um importante avanço nesse sentido ao promover a digitalização e integração das informações associadas aos acessos conservados. O sistema integra dados fenotípicos, agronômicos e moleculares, ampliando a rastreabilidade dos materiais e o uso dos recursos genéticos em pesquisas e programas de melhoramento (Brasil, 2022d).

3.3 Recursos genéticos e adaptação climática

A integração entre conservação genética, caracterização dos acessos e digitalização das informações fortalece a capacidade de identificar materiais com potencial para enfrentar os desafios futuros da agricultura. Dessa forma, o Banco Ativo de Germoplasma da CEPLAC e o projeto CATBAG-Cacau configuram-se como instrumentos estratégicos para a conservação da biodiversidade agrícola e para a construção de uma cacauicultura mais sustentável e resiliente (FAO, 2019; Faleiro; Queiroz; Lopes, 2008).

Figura 1 – Relação entre conservação genética e adaptação climática.



Fonte: Autores, 2026.

Os resultados demonstram que a conservação da diversidade genética do cacaueiro transcende a preservação biológica, constituindo uma estratégia de inovação tecnológica, fortalecimento da pesquisa científica, sustentabilidade produtiva e adaptação climática (Faleiro; Queiroz; Lopes, 2008; FAO, 2019). A manutenção e o aprimoramento de iniciativas como o Banco Ativo de Germoplasma da CEPLAC e o CATBAG-Cacau representam investimentos fundamentais para assegurar a competitividade da cacauicultura brasileira, ampliar as possibilidades de melhoramento genético e contribuir para a conservação da biodiversidade agrícola em um contexto de crescentes desafios ambientais (BRASIL, 2022a; BRASIL, 2022d; Lahive *et al.*, 2021).

4 CONCLUSÃO

A conservação dos recursos genéticos do cacaueiro (*Theobroma cacao* L.) revela-se uma estratégia essencial para a manutenção da biodiversidade agrícola, para o fortalecimento da pesquisa científica e para a construção de sistemas produtivos mais resilientes diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas. A análise realizada evidenciou que o Banco Ativo de Germoplasma da CEPLAC desempenha papel central nesse processo ao conservar uma ampla diversidade genética representada por mais de 53 mil plantas e aproximadamente 2.200 genótipos distintos, constituindo um dos mais relevantes patrimônios fitogenéticos da cacauicultura mundial.

Os resultados demonstram que a diversidade genética conservada no banco representa uma importante fonte de características relacionadas à produtividade, resistência a doenças, qualidade das amêndoas e adaptação a condições ambientais adversas. Nesse sentido, o Catálogo de Descritores do Banco Ativo de Germoplasma e as iniciativas de digitalização promovidas pelo projeto CATBAG-Cacau ampliam significativamente o potencial de utilização desses recursos, favorecendo a caracterização dos acessos, a gestão das informações genéticas e a seleção de materiais promissores para programas de melhoramento vegetal.

Além de sua contribuição para a conservação da agrobiodiversidade, o Banco Ativo de Germoplasma da CEPLAC assume papel estratégico na adaptação da cacauicultura aos cenários climáticos futuros. A crescente ocorrência de secas prolongadas, alterações nos regimes pluviométricos e aumento da incidência de doenças reforça a necessidade de ampliar o uso de recursos genéticos como base para o desenvolvimento de cultivares mais resilientes. Assim, a conservação genética deixa de ser apenas uma ação de preservação biológica e passa a constituir um instrumento de inovação tecnológica, segurança produtiva e sustentabilidade agrícola.

Como perspectivas futuras, destaca-se a necessidade de intensificar estudos utilizando ferramentas de genômica, fenômica e bioinformática para ampliar o conhecimento sobre os mecanismos genéticos associados à tolerância ao estresse hídrico, resistência a patógenos e adaptação climática. Também se mostra relevante a integração dos dados do CATBAG-Cacau com plataformas nacionais e internacionais de recursos genéticos, fortalecendo redes colaborativas de pesquisa e intercâmbio científico.

Outra abordagem promissora consiste na utilização de técnicas de inteligência artificial e modelagem climática para identificar genótipos com maior potencial adaptativo frente aos diferentes cenários projetados para as regiões produtoras de cacau. Adicionalmente, recomenda-se ampliar as pesquisas voltadas à conservação *in situ* de populações nativas de cacaueiro na Amazônia, complementando as estratégias de conservação *ex situ* já desenvolvidas pela CEPLAC.

Por fim, conclui-se que o fortalecimento das ações de conservação, caracterização e uso sustentável dos recursos genéticos do cacaueiro será determinante para a competitividade da cacauicultura brasileira, para a preservação da biodiversidade agrícola e para a construção de sistemas produtivos capazes de responder aos desafios ambientais, econômicos e sociais das próximas décadas.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Brasil mantém no Pará maior banco de material genético de cacau do mundo**. Brasília: MAPA, 2022a.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **CEPLAC: 65 anos de pesquisa e tecnologia para o cacau brasileiro**. Brasília: MAPA, 2022b.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **CEPLAC é reconhecida como celeiro científico e órgão de desenvolvimento regional**. Brasília: MAPA, 2022c.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Catálogo de Descritores do Banco Ativo de Germoplasma de Cacau**. CEPLAC, 2022d.

CACAONET. **Technical Guidelines for the Safe Movement of Cacao Germplasm**. Montpellier: Bioversity International, 2021. Acesso em: 20 de maio de 2026.

DWIVEDI, S. L. et al. Crop genetic resources and climate change adaptation. **Trends in Plant Science**, v. 21, n. 11, p. 961-973, 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **The State of the World's Biodiversity for Food and Agriculture**. Rome: FAO, 2019.

FALEIRO, F. G.; JUNQUEIRA, N. T. V.; BRAGA, M. F. Recursos genéticos e melhoramento de plantas. In: NASS, L. L. (org.). **Recursos Genéticos Vegetais**. Brasília: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2007.

FALEIRO, F. G.; QUEIROZ, M. A.; LOPES, M. A. **Recursos genéticos vegetais**: conservação, caracterização e uso. Brasília: Embrapa Cerrados, 2008.

LAHIVE, F. *et al*. Climate change impacts on cacao: genotypic variation in responses of mature cacao to elevated CO_2 and water deficit. **Agronomy**, v. 11, n. 5, p. 818, 2021.

LAVOIE, A. et al. Local working collections as the foundation for an integrated conservation of Theobroma cacao L. in Latin America. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 10, 2023.

PIRES, J. L.; MONTEIRO, W. R.; PINTO, L. R. Melhoramento genético do cacaueiro para resistência a doenças. **Agrotrópica**, [s. l.], 2012.

Informações sobre a Editora
Wissen Editora
Homepage: www.editorawissen.com.br
Teresina – Piauí, Brasil
E-mail: wisseneditora@gmail.com

Siga nossas redes sociais:
@wisseneditora



Wissen editora
2026