



ORGANIZADOR

FÁBIO LUIZ PARTELLI

REALIZAÇÃO



SÃO MATEUS - ES - 2025

CAFÉ CONILON: Adaptação às Mudanças Climáticas

Organizador
Fábio Luiz Partelli

**São Mateus - ES
2025**

Todos os direitos estão reservados.
Proibida a reprodução total ou parcial.
Sanções Previstas na Lei nº 9610 de 19.02.1998.

Tiragem: 1.000 exemplares IMPRESSOS

Online: www.cafeconilon.com

Capa: Fábio Luiz Partelli e Fábio Lemos Carolino

Partelli, Fábio Luiz.

CAFÉ CONILON: Adaptação às Mudanças Climáticas / Fábio Luiz
Partelli, Organizador - São Mateus, ES: 2025.

158 p.: il. ; 14 x 21 cm.

Inclui bibliografia

ISBN: 978-65-01-74134-5

1. *Coffea canephora*. 2. Café Conilon. 3. Simpósio do Produtor de Conilon.
4. Pesquisas. 5. Mudanças climáticas. 6. Estresse.

CDU: 630



Dedicamos este livro aos cafeicultores principais responsáveis pelo sucesso da CAFEICULTURA!!!!

Agricultores Homenageados pelo evento:

2016 – 5º Simpósio do Produtor de Conilon:

Amistrong Luciano Zanotti - Nova Venécia - ES

Irmãs Brioschi (Almira e Inês) – Jaguaré - ES

João Colombi - São Gabriel da Palha - ES (*In Memoriam*)

2017: 6º Simpósio do Produtor de Conilon:

Jarbas Alexandre Nicoli Filho –Jaguaré - ES

José Verly – Muqui - ES

Wanderlino Medeiros Bastos – São Gabriel da Palha - ES

2018: 7º Simpósio do Produtor de Conilon:

Irmãos Cobre (Carlos, Isaac e Moyses) – Pinheiros - ES

Irmãos Partelli (Luiz e Ozílio) –Vila Valério - ES

José Bonomo – São Mateus - ES

2019: 8º Simpósio do Produtor de Conilon:

Eliseu Bonomo – São Mateus - ES

Marizete Marim Menegardo –Jaguaré - ES

Rogério Colombi de Freitas – São Gabriel da Palha - ES

2020: 9º Simpósio do Produtor de Conilon:

Silvestre Baiôco Filho (Pepe) – Aracruz - ES

Irmãos Venturim (Isaac e Lucas) – São Gabriel da Palha – ES

2021: 10º Simpósio do Produtor de Conilon:

Elias de Paula – Nova Venécia - ES

Gustavo Martins Sturm – Teixeira de Freitas - BA

Luis Carlos da Silva Gomes – Santa Teresa - ES

2022: 11º Simpósio do Produtor de Conilon:

André Monzoli Covre – Itabela – BA

Elair Caldeira Barbosa – Vila Valério - ES

Juan Travain – Cacoal – RO

2023: 12º Simpósio do Produtor de Conilon:

Geralda Soares Colombi – São Gabriel da Palha – ES

Edgar Bastianello – Nova Venécia – ES

Gerson Cosme – Jaguaré – ES

2024: 13º Simpósio do Produtor de Conilon:

Adauto Orletti e filhos – Pinheiros – ES

Irmãos Reniki Junior e Ronaldo Ronquette – Rio Bananal – ES

Geraldo da Silva (Casiano) e Família – São Mateus – ES

2025: 14º Simpósio do Produtor de Conilon:

Sebastião Ton – Aimorés – MG

Casal: Rosangela Dal Bo e José Pereira – Rio Bananal – ES

Luiz Marcos Stocco – Vila Valério – ES

AGRADECIMENTOS

Os organizadores, agradecem à **Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes)**, ao Centro Universitário Norte do Espírito Santo (Ceunes), pelo apoio na realização de todas as edições do “Simpósio de Produtor de Conilon”. Agradecimentos à **Empresa Junior de Agronomia - Projagro** e demais acadêmicos do curso de Agronomia pelo apoio na organização.

Ao apoio fundamental realizado pelo Crea-ES, Mutua-ES, Rovensa Next, Colombo, P&A, Prefeitura de São Mateus, OCB-ES, Amazon AgroSciences, Yara, Defesa Agrícola, Basf, FMC, Fapes, Nicoli Agronegócios, Coaabriel, Viveiro Marinato, Incaper, Conesão Safra, Rede Nova Onda, Ifes, Iniav e Faesa.

Agradecimentos também aos palestrantes do 14º Simpósio do Produtor de Conilon e aos autores dos capítulos do livro.

Comissão Organizadora

PREFÁCIO

O Estado do Espírito Santo possui apenas um Universidade Federal. A Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes) contribui de forma significativa com a sociedade Capixaba, Brasileira e Mundial, com ensino, pesquisa e extensão por mais de 70 anos. Atua fortemente com a cultura do Café Conilon/Robusta, com ações no ensino, extensão, formação de recursos humanos e na produção de pesquisa, sendo a instituição que mais publica artigos científicos sobre café Conilon/Robusta do mundo.

O Centro Universitário Norte do Espírito Santo (Ceunes), com quase 20 anos contribui de forma grandiosa por meio de ensino superior, com 17 cursos de graduação, dentre eles o de Agronomia, cinco cursos de mestrado, dois de doutorado, pesquisas e extensão. Portanto, temos uma Universidade **pública e de qualidade a serviço da sociedade.**

Foram 13 livros relacionados aos 14 eventos (Simpósio do Produtor de Conilon), sendo **IMPRESSOS e DISPONIBILIZADOS 13 MIL LIVROS, principalmente aos CAFEICULTORES**, aos brasileiros e a diversos países do mundo. Este ano serão **MAIS MIL LIVROS IMPRESSOS**, atingindo a marca de **14 MIL LIVROS IMPRESSOS**. Essa edição conta com a participação de 58 autores e com 158 páginas.

Os livros também estão disponíveis em formato digital, podendo ser encontrado em **WWW.CAFECONILON.COM**.

ORGANIZADOR/AUTOR

Fábio Luiz Partelli: Agricultor até os 18 anos. Engenheiro Agrônomo pela Ufes (2002). Mestrado e Doutorado em Produção Vegetal pela Uenf (2004/2008), parte realizado em Portugal. Professor Titular e orientador de iniciação científica, mestrado e doutorado na Ufes. Bolsista Produtividade Científica do CNPq, nível 1B (A).

AUTORES

Adésio Ferreira: Engenheiro Agrônomo (Ufes, 2002). Mestre em Genética e Melhoramento (UFV, 2003). Doutor em Genética e Melhoramento (UFV, 2006). Professor da Ufes e bolsista de produtividade do CNPq.

Adriene Caldeira Batista: Engenheira Agrônoma (2023) e Mestre em Produção Vegetal (2025) pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Atua como pesquisadora em modelagem de nicho ecológico e mudanças climáticas. Faz parte do Grupo AgriMe.

Aldemar Polonini Moreli: É professor efetivo do IFES, atuando na função de docente e coordenador de projetos de pesquisa e de extensão focados na cafeicultura, onde também coordena o Programa Qualidade Total para a Cafeicultura. Sua produção científica atual: 33 artigos científicos, 5 capítulos de livro e 2 registros de patentes.

Alex Campanharo: Eng. Agrônomo (Ufes, 2016). Mestre em Agricultura Tropical (Ufes, 2019). Doutor em Genética e Melhoramento (Ufes, 2025). Consultor e Técnico da Fazenda Experimental da Ufes, São Mateus-ES.

Alex Silva Lima: Graduado em Agronomia (UFES/2019). Mestre em Agricultura Tropical (UFES/2022). Doutorando em Genética e Melhoramento de Plantas pela Ufes.

Anne Reis Santos: Mestre em Produção Vegetal, atua como pesquisadora em ecofisiologia vegetal, com ênfase na fisiologia do cafeeiro e nos efeitos da radiação ultravioleta (UV). Doutoranda em Biotecnologia Vegetal na UENF, possui experiência em estudos sobre os efeitos de estresses abióticos em processos fisiológicos.

Angela Maria dos Santos Pessoa: Engenheira agrônoma; Mestre. Doutora em Agronomia. Professora, orientadora na iniciação científica pela UNIR, lotada no Campus de Rolim de Moura/RO.

Antonio Fernando de Souza: Eng. Agrônomo pela UFV (2003) e Doutor em Fitopatologia pela UFV (2008). Atua como Professor EBTT, classe Titular, no IFES Campus Santa Teresa, onde desenvolve pesquisas na área de manejo

integrado de doenças e coordena o programa de extensão Clínica Fitopatológica do Laboratório de Diagnóstico de Doenças de Plantas.

Cleidson Alves da Silva: Engenheiro Agrônomo (Unir, 2016). Mestre em Agricultura Tropical (Ufes, 2020). Doutor em Agronomia (Fitotecnia) (Ufla, 2024). Pesquisador da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (Epamig).

Deurimar Herênio Gonçalves Júnior: Engenheiro Agrônomo (Uema, 2017). Mestre em Genética e Melhoramento de Plantas (Uenf, 2019). Doutor em Genética e Melhoramento (UFV, 2025). Especialista em Inteligência Artificial e Big Data (USP, 2025). Pós-Doutor na Universidade Federal do Espírito Santo.

Edmond Joseph Djibril Victor Barry: Engenheiro Agrônomo (2025), natural do Senegal, e mestrando em Produção Vegetal pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM). Membro do Grupo Agricultura e Modelagem Ecológica (AgriMe).

Ellen Vieira da Silva: Técnica em Edificações pelo IFES. Graduanda em Agronomia pelo IFES Campus Santa Teresa e Bolsista de Iniciação Científica do Laboratório de Diagnóstico de Doenças de Plantas.

Eliemar Campostrini: Docente de Fisiologia/Ecofisiologia de Culturas Tropicais e Subtropicais e pesquisador doutor na UENF. Possui mais de 174 publicações científicas. Atua investigando os efeitos de fatores ambientais (água, temperatura, luz) sobre processos fisiológicos como trocas gasosas, fluxo de seiva, pigmentos e fluorescência.

Fabiano Guimarães Silva: Licenciado em Ciências Agrárias. Mestre. Doutor em Agronomia. Professor, orientador no mestrado e doutorado pelo IFGoiano, lotado no Campus de Rio Verde/GO.

Fernanda dos Santos Farnese: Bióloga. Mestre. Doutora em Fisiologia Vegetal. Professora, orientadora no mestrado e doutorado pelo IFGoiano, lotado no Campus de Rio Verde/GO.

Guilherme Augusto Rodrigues de Souza: Doutor em Produção Vegetal pela UENF, com foco em ecofisiologia vegetal. Atualmente, é pesquisador de pós-doutorado na Università Cattolica del Sacro Cuore (Itália), com bolsa CNPq. Sua pesquisa envolve respostas ecofisiológicas de *Coffea canephora* à seca e efeitos de altas temperaturas em mamoeiro.

Idalina Sturião Milheiros: Bacharel Administração (2022), MBA em Agronegócio (2026). Técnica em Desenvolvimento Rural - Agropecuária pelo Incaper. É co-autora de 7 artigos científicos e 1 capítulo de livro.

Idelfonso Leandro Bezerra: Engenheiro agrônomo. Mestre. Doutor em Engenharia agrícola. Professor, orientador na iniciação científica e no mestrado pela UNIR, lotado no Campus de Rolim de Moura/RO.

Jane Meri Santos: Professora aposentada da UFES e Bolsista de Produtividade em Pesquisa nível 1C do CNPq. Graduada em Eng. Mecânica pela UFES e doutora em Engenharia Ambiental pela University of Manchester. Publicou mais de 90 artigos científicos em periódicos nacionais e internacionais.

Jairo Rafael Machado Dias: Engenheiro agrônomo. Mestre. Doutor em Produção Vegetal. Professor, orientador na iniciação científica, tecnológica e no mestrado pela UNIR - Campus de Rolim de Moura/RO.

João Felipe de Brites Senra: Eng. Agrônomo (2010), Mestre em produção vegetal (2012), D.Sc. Genética e Melhoramento de Plantas (2016). Agente de Extensão em Desenvolvimento Rural pelo Incaper. Professor colaborador do PPGGM da UFES. É autor de 28 artigos científicos e 3 livros. Editor adjunto do periódico Incaper em Revista.

José Maria Rodrigues da Luz: É Bioquímico (2007) e realiza Pós-doutorado na UFV. Ele participa do desenvolvimento de estudos sobre fermentação microbiana, qualidade química, nutricional e sensorial de café. Sua produção científica atual: 76 artigos científicos, 9 capítulos de livros, 8 registros de patentes e 5 cartas patentes.

José Cochicho Ramalho: Biólogo, doutorado em Fisiologia e Bioquímica de Plantas pela Universidade de Lisboa (1998). É investigador do ISA da Universidade de Lisboa. Desenvolve estudos multidisciplinares relativos aos mecanismos de resposta e resiliência das plantas num contexto de alterações climáticas, com foco principal no género tropical *Coffea* sp.

Julia Sperandio Schulz: Técnica em Administração pelo IFES Campus Centro Serrano. Graduanda em Agronomia pelo IFES Campus Santa Teresa e Bolsista de Iniciação Científica do Laboratório de Diagnóstico de Doenças de Plantas.

Júlio Antônio Saraiva Aguiar: Engenheiro Agrônomo UFV 1993. Produtor Rural Co-fundador do Khas Café

Karen Mirella Souza Menezes: É Zootecnica (2012) e faz Pós-doutorado na UFV com atuação na área de café com fungos micorrízicos arbusculares, bactéria fixadora de nitrogênio e isolamento de micro-organismos do fruto do café. Publicou 8 artigos científicos, 1 capítulo e 28 resumos.

Laricia Olária Emerick Silva: Graduada em Ciências Biológicas (IFES/2018). Mestra e Doutora em Genética e Melhoramento pela UFES.

Leandro Mendel da Cruz: Graduado em Agronomia pela UFES (2008), mestre em Agronomia pela UFES (2023), discente de doutorado em Genética e

Melhoramento (UFES), atuando como Agente de Extensão em Desenvolvimento Rural no Incaper.

Lucas Broedel Cabral: Produtor de café desde 2020. Eng. Agrônomo (2022) e especialista em fisiologia vegetal, nutrição e desenvolvimento de plantas (2025). Avaliador e classificador de café conilon (2023). Bicampeão municipal no concurso de qualidade de café do município de Sooretama (2023 e 2024).

Lucas Louzada Pereira. É Diretor de Operações da Mió Brasil e professor licenciado do IFES. Ele desenvolve pesquisas em química, bioquímica, processos de fermentação, microbiologia e qualidade sensorial do café. Sua produção científica atual: 88 artigos científicos, 10 livros, 12 capítulos e 5 registros de patentes.

Marcela Campanharo: Engenheira Agrônoma (Ufes, 2002). Mestre em Ciência do Solo (UFRPE, 2006). Doutora em Produção Vegetal (Uenf, 2010). Professora na Ufes, Campus São Mateus.

Marcelo Barreto da Silva: É professor titular da Ufes. Doutor em Fitopatologia pela UFV. Pós-doutor pela Kansas University e pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Coordena o programa Agro+: por uma agricultura mais sustentável. Desenvolve projetos de inovação em produtos fitossanitários e fitoterápicos.

Marcia Flores da Silva Ferreira: Graduada em Ciências Biológicas. Mestra em Genética e Melhoramento. Doutora em Genética e Melhoramento (UFV/2006). Pós-doutorado em Biologia Molecular de Plantas (UFV/2016). Professora na Ufes.

Marcos Valério Vieira Lyrio: Graduado em Engenharia Química. Mestre em Química. Doutorando em Química (UFES). Pesquisador na Fundação Espírito-Santense de Tecnologia.

Maria Fernanda Peixoto Gama: Licenciada em Ciências da Natureza – Ciências e Biologia (IFF/2023). Mestranda em Genética e Melhoramento (UFES/2024).

Marinaldo Loures Ferreira: Engenheiro Civil e Gestor do Agronegócio. Doutor e Mestre em Produção Vegetal pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Professor do curso de Agronomia da FACTU. Atua como pesquisador em geotecnologias aplicadas à agricultura, modelagem de nicho ecológico e sustentabilidade hídrica.

Marliane de Cássia Soares da Silva: É professora associada da UFV com atuação em Microbiologia, com os seguintes temas: cogumelos, fungos micorrízicos e bactérias fixadoras de nitrogênio. Sua produção científica atual:

74 artigos científicos, 18 capítulos de livros, 2 registros de patentes e 2 orientações de mestrado.

Maysa Bromerschenkel da Silva: Técnica em Administração pelo IFES Campus Centro Serrano. Graduanda em Agronomia pelo IFES Campus Santa Teresa.

Maskio Darós: Eng. Agrônomo (Ufes, 1997). Mestre e doutor em Produção Vegetal (Uenf, 1999/2003). Extensionista Agropecuário na Emater-MG.

Neyval Costa Reis Junior: Professor Titular da Ufes e Bolsista de Produtividade em Pesquisa nível 1C do CNPq. Graduado em Eng. Mecânica pela Ufes e doutor em Engenharia Ambiental pela University of Manchester. Publicou mais de 80 artigos científicos em periódicos. Coordenou a elaboração do Plano Estadual de Descarbonização do ES.

Niquisse José Alberto: Engenheiro Agrônomo (Universidade Católica de Moçambique, 2016). Mestre em Genética e Melhoramento (Ufes, 2022). Doutorando em Genética e Melhoramento na Ufes.

Paulo Eduardo Menezes-Silva: Biólogo. Mestre. Doutor em Fisiologia Vegetal. Professor, orientador no mestrado e doutorado pelo IFGoiano, lotado no Campus de Rio Verde/GO. Coordenou o estudo que revelou alta vulnerabilidade hidráulica nos cafeeiros robustas amazônicos.

Pedro Henrique Bonfim Pantoja: Graduado em Meteorologia pela UFPA e mestre em Engenharia Ambiental pela UFES. Pesquisador do INCAPER, atua nas áreas de climatologia, projeções climáticas e análise de dados.

Renan Batista Queiroz: Eng. Agrônomo e Doutor em Entomologia pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Pesquisador do Incaper. Professor e coordenador do curso de Agronomia da FAESA. Atualmente, atua com Desenvolvimento de Mercado da FIRST AGRIBIOTECH. Desde 2014 desenvolve pesquisas com Manejo Integrado de Pragas.

Ricardo Siqueira da Silva: Engenheiro Agrônomo (2010), mestre (2012) e doutor (2016). Professor do Departamento de Agronomia da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, docente dos Programas de Pós-Graduação em Produção Vegetal e Ciência Florestal, e coordenador do Grupo Agricultura e Modelagem Ecológica (AgriMe).

Roberta Reis Rosa Aguilar: É publicitária (Faesa 2004), pós-graduada em marketing (FGV 2007) e desenvolvimento de embalagens. Produtora de cafés especiais, barista e cofundadora do Khas Café. Atua em branding territorial, design e turismo, criando experiências e estratégias que conectam agricultura, cultura, economia criativa e consumo consciente.

Robson Bonomo: Graduado em Agronomia (UFV/1992). Mestre em Engenharia Agrícola (UFV/1994). Doutor em Engenharia Agrícola (UFV/1999). Professor na Universidade Federal do Espírito Santo.

Rosana Gomes de Oliveira: Licenciada em Ciências Biológicas. Pós-graduada em Biotecnologia. Mestra em Genética e Melhoramento (UFES/2024). Doutoranda em Genética e Melhoramento (UFES/2024).

Sebastião Ton: Cafeicultor em Aimorés-MG.

Tafarel Victor Colodetti: Eng. Agrônomo (2014), Mestre e Doutor (2016/2019) em Produção Vegetal. Agente de Pesquisa e Inovação em Desenvolvimento Rural do Incaper. Membro do Núcleo de Pesquisas Cafeeiras do CCAE da Ufes. É autor de mais de 70 artigos em periódicos, 3 livros, 7 capítulos e mais de 120 trabalhos publicados em eventos.

Thalita Sousa Silva: Licenciada em Ciências Biológicas (2024) Mestranda em Genética e Melhoramento de Plantas (2024 - atual).

Vanessa Gonçalves do Nascimento: Eng. Agrônoma (2025) e mestranda em Produção Vegetal pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Integra o Grupo Agricultura e Modelagem Ecológica (AgriMe).

Vando Miossi Rondelli: Engenheiro agrônomo. Mestre. Doutor. Pós-doutor em Entomologia Agrícola. Professor, orientador na iniciação científica e no mestrado pela UNIR, lotado no Campus de Rolim de Moura/RO.

Wagner Nunes Rodrigues: Eng. Agrônomo (2008), Mestre (2010) e Doutor (2014) em Produção Vegetal. É Agente de Pesquisa e Inovação em Desenvolvimento Rural do Incaper e professor do Centro Universitário Unifacig. Autor de mais de 100 artigos científicos, 10 livros, 20 capítulos de livros e 100 trabalhos em anais de eventos.

Wallace de Paula Bernado: Doutor em Produção Vegetal pela UENF. Atualmente é pesquisador de pós-doutorado da FAPESP, no Centro de Citricultura Sylvio Moreira (IAC). Tem experiência na área de Botânica, com ênfase em Fisiologia Vegetal, atuando principalmente nos seguintes temas: fotossíntese e mudanças climáticas.

Weverton Pereira Rodrigues: Doutor em Produção Vegetal e professor/pesquisador da UEMASUL. Dedicar-se ao estudo da Fisiologia e Ecofisiologia de culturas tropicais, com ênfase na investigação da influência de fatores ambientais sobre os processos bioquímicos e fisiológicos de plantas de interesse agrícola.

Willian dos Santos Gomes: Graduado em Ciências Biológicas, Mestre e Doutor em Genética e Melhoramento de Plantas. Membro do Coffe Design Group.

SUMÁRIO

<u>Capítulo 1.</u> Indicação de cinco genótipos de <i>Coffea canephora</i> para baixa temperatura: 1.100 metros de altitude no CAXIXE	15
<u>Capítulo 2.</u> Indicação de cinco genótipos de <i>Coffea canephora</i> para Minas Gerais. Quatro colheitas em AIMORÉS	21
<u>Capítulo 3.</u> Impacto das Mudanças Climáticas na Agricultura do Espírito Santo	29
<u>Capítulo 4.</u> Influência do estresse na predisposição do cafeeiro às doenças abióticas	43
<u>Capítulo 5.</u> Impacto de mudanças climáticas em pragas com ênfase no café	57
<u>Capítulo 6.</u> Conilon de qualidade em Sooretama: uma jornada de tradição e sucessão familiar	71
<u>Capítulo 7.</u> Qualidade na Altitude	81
<u>Capítulo 8.</u> Cafeicultura do Futuro: A Importância Estratégica da Diversidade Genética do <i>Coffea canephora</i>	87
<u>Capítulo 9.</u> Desafios e possibilidades para o melhoramento genético do cafeeiro conilon como estratégia mitigadora das mudanças climáticas	99
<u>Capítulo 10.</u> Desafios ecofisiológicos dos cafeeiros robustas amazônicos cultivados em terras Capixabas	113
<u>Capítulo 11.</u> Radiação solar no cafeeiro: desafios e adaptações para o sucesso no pós-transplântio	129
<u>Capítulo 12.</u> <i>Coffea canephora</i>: microbiota do cafeeiro e qualidade do café em função das condições climáticas	143

CAPÍTULO 1

Indicação de cinco genótipos de *Coffea canephora* para baixa temperatura: 1.100 metros de altitude no CAXIXE

**Fábio Luiz Partelli, Júlio Antônio Saraiva Aguilar, Roberta Aguilar,
Robson Bonomo, José Cochicho Ramalho, Lucas Louzada Pereira,
Willian dos Santos Gomes, Alex Silva Lima,
Aldemar Polonini Moreli, Maria Fernanda Peixoto Gama,
Rosana Gomes de Oliveira, Marcia Flores da Silva Ferreira,
Weverton Pereira Rodrigues, Larícia Olária Emerick Silva,
Leandro Mendel da Cruz, Marcos Valério Vieira Lyrio.**

1. Introdução

Inovações tem ocorrido na cafeicultura, com foco no manejo, produtividade, sustentabilidade e também na qualidade, o que demanda tecnologia. O *Coffea canephora* apresenta grande diversidade, permitindo novas oportunidades para o cultivo e novas fronteiras de cultivo. Recentemente o *Coffea canephora*, tem surgido, apresentado grande interesse em áreas de maior altitude, de baixa temperatura, principalmente no Espírito Santo, Minas Gerais e até São Paulo. Assim, estudos sobre diferentes genótipos, realizados por meio de ensaios de desempenho no campo em condições de elevada altitude/baixa temperatura são importantes para auxiliar no entendimento e seleção de materiais promissores, com foco na tolerância a baixas temperaturas.

2. Desenvolvimento da Pesquisa

Foram identificadas e até mesmo registrado genótipos de café Conilon/Robusta ao longo dos anos em condições de baixa altitude. Esses genótipos foram agora estudados em outras condições climáticas. As informações a seguir são baseadas num plantio composto por 24 genótipos de *Coffea canephora* propagados por estaca e três variedades de *Coffea arábica* propagados por sementes. O plantio cultivado em 08 de junho de 2019, no município de Venda Nova do Imigrante, Estado do Espírito Santo, a aproximadamente 1.100 metros de altitude.

A área experimental está localizada na Latitude: 20°26'08"S, 41°03'58"W (Figura 1). O clima da Região é tropical de altitude, caracterizado por temperaturas amenas durante o ano, com duas estações distintas: um período mais frio e seco entre maio e setembro, e outro ligeiramente quente e mais úmido de outubro a abril, com maior volume de chuvas. Destaca-se que na área do experimento, é comum temperaturas inferiores a 5°, ao amanhecer, por muitos dias. Final de 2023 e início de 2024 foi um período seco, o que afetou significativamente as plantas. Por sua vez, 2024 foi um ano mais quente o que atenuou o estresse por baixa temperatura.

O plantio foi realizado em delineamento na forma de blocos casualizados, com três repetições de campo, sendo cada repetição composta por quatro plantas. Foram realizadas adubações conforme a análise de solo e produtividade média esperada. O espaçamento utilizado para plantio foi de 3,0m X 0,6m, tendo 5.556 plantas por hectare. Foram realizadas podas para controle de ramos excessivos, mantendo o padrão de dois galhos por planta. A área experimental foi irrigada apenas na sua formação, deixando de ser irrigada após um ano de idade. O trabalho teve apoio da Fapes e do Khas café.

Para analisar a produtividade, a estabilidade e adaptabilidade dos materiais genéticos avaliados neste estudo foram utilizados dados de produtividades correspondentes a quatro colheitas (2022, 2023, 2024 e 2025), descritas na Tabela 1. Não foi considerada a primeira produção, pois foi muito

pequena, mesmo para os genótipos mais adaptados.

Dentre todos os materiais avaliados no ensaio, considerando características como produtividade (de quatro colheitas), arquitetura da planta, vigor e resistência a pragas e doenças, foram selecionados cinco genótipos julgados superiores (**CH1, A1, K61, Pirata e L80**), para constituir a nova cultivar clonal, a ser denominada de **Caxixe** (pedido realizado junto à Ufes/Mapa no segundo semestre de 2025).

A média das quatro colheitas dos cinco genótipos foi de **59,60** sacas por hectare por ano, enquanto a média dos demais genótipos de *C. canephora* foi de **17,81** sacas por hectare por ano (Tabela 1). A média das três cultivares de *C. arabica* (Catucaí 2SL - amarelo, Arara – amarelo e Catucaí 785 - amarelo), foi de **42,05** sacas por hectare por ano. Destaca-se que 11 genótipos produziram menos três sacas de café beneficiado por hectare.

Durante os mais de sete anos de avaliação foi verificada a uma adaptação dos genótipos às condições de cultivo, visto seu bom desempenho em crescimento e produção, comparado aos demais genótipos da espécie e aos cultivares de café arábica. Não foi verificado ataque severo das principais pragas e doenças, com as plantas mantendo-se vigorosas e com bom enfolhamento.

Dessa forma, a nova cultivar proposta, apresenta características desejáveis, sobretudo, alta produtividade para as condições de elevada altitude (mais de mil metros), o que permitirá aceitação entre os cafeicultores, podendo ser cultivado em condições climáticas similares às que foram cultivadas (aproximadamente 1.000 metros de altitude). Portanto, se recomenda para regiões de elevada altitude/baixas temperaturas do Estado do Espírito Santo. De modo geral pode ser recomendada para outras regiões do Estado do Espírito Santo e outros Estados, em altitudes inferiores a 1.300 metros, desde que as condições climáticas sejam similares às condições do estudo. Ressalta-se que este foi o primeiro trabalho de campo com esse objetivo para condições acima de mil metros no Brasil.

Tabela 1. Produtividade média anual nas safras de 2022 a 2025 e período de maturação dos genótipos que compõe a cultivar proposta (Caxixe).

Genótipos	Prod. ano 1	Prod. ano 2	Prod. ano 3	Prod. ano 4	Média 4 colheitas	Maturação
	sac ha ⁻¹	sac ha ⁻¹	sacas ha ⁻¹	sacas ha ⁻¹	sacas ha ⁻¹	-
CH1	40,49	79,47	43,14	157,05	80,04	Precoce
A1	28,63	71,58	66,41	93,45	65,02	Médio
K61	18,93	53,10	71,57	96,97	60,14	Médio
Pirata	11,04	54,80	26,81	122,21	53,71	Precoce
L80	22,00	45,87	32,76	55,69	39,08	Precoce
Média - Caxixe					59,60	-
Média dos demais genótipos de <i>Coffea canephora</i>					17,81	-
Média das três cultivares de <i>C. arabica</i> avaliadas					42,05	



Figura 1. Vista/localização da lavoura, Imagem de junho de 2024. Retângulo abaixo da seta. Latitude: 20°26'08\" S, Longitude: 41° 03' 58\" W, a 1.100 metros de altitude.

Algumas fotos da área experimental





CAPÍTULO 2

Indicação de cinco genótipos de *Coffea canephora* para Minas Gerais. Quatro colheitas em AIMORÉS

**Alex Campanharo, Maskio Darós, Sebastião Ton,
Marcela Campanharo, Adésio Ferreira,
Deurimar Herênio Gonçalves Júnior, Niquisse José Alberto,
Cleidson Alves da Silva, Fábio Luiz Partelli**

1. Introdução

A cafeicultura brasileira tem passado por transformações expressivas nas últimas décadas, impulsionadas pela necessidade de ampliar a produtividade, adotar práticas mais sustentáveis e responder aos efeitos das mudanças climáticas. Nesse contexto, o cultivo de *Coffea canephora* (Conilon/Robusta) vem ganhando destaque, consolidando-se como alternativa estratégica e expandindo-se para além de suas regiões tradicionais de produção.

Originalmente concentrada no Espírito Santo e em áreas específicas da Bahia e de Rondônia, a cafeicultura de *C. canephora* encontrou no Leste de Minas Gerais condições edafoclimáticas favoráveis à sua expansão. Essa região, marcada por temperaturas mais elevadas e altitudes variando entre 250 e 600 metros, apresenta limitações para o cultivo de *C. arabica*, mas revela elevado potencial para o desenvolvimento do Conilon. A diversificação

geográfica, nesse caso, não apenas amplia a base produtiva nacional, mas também permite aproveitar ambientes onde o arábica enfrenta restrições agronômicas.

Foi nesse cenário que surgiu a necessidade de desenvolver materiais genéticos específicos para a realidade mineira. Até então, o crescimento da atividade encontrava-se limitado pela escassez de cultivares validadas para essas condições, o que levava os produtores a recorrerem a materiais oriundos de outras regiões, muitas vezes com desempenho instável. Assim, consolidou-se a proposta de criação de um programa de melhoramento capaz de atender às demandas locais e garantir a sustentabilidade da expansão da cultura.

O resultado desse esforço foi o programa que deu origem a um pedido de registro de cultivar feito pela UFES, junto ao MAPA, tendo sido proposto o nome de AIMORÉS, o que pode ser a primeira cultivar específica para regiões baixas do Estado de Minas Gerais. A iniciativa, liderada pela Universidade Federal do Espírito Santo - Centro Universitário Norte do Espírito Santo (São Mateus, ES), junto com a Emater-MG, de Pocrane. Teve início formal em 2018, a partir de um amplo trabalho de prospecção em lavouras seminais da região.

O objetivo central consistiu em identificar e selecionar genótipos capazes de reunir alta produtividade e estabilidade de produção. O processo caracterizou-se por uma abordagem participativa, em que o conhecimento empírico dos cafeicultores sobre plantas de desempenho excepcional em suas propriedades foi incorporado às etapas iniciais de seleção, fortalecendo a integração entre ciência e prática agrícola.

O experimento foi conduzido no município de Aimorés, localizado na região leste do estado de Minas Gerais, nas coordenadas 19°34'52" S de latitude e 41°22'59" W de longitude, a uma altitude de 270 metros (Figura 1). O clima da região é caracterizado como tropical com inverno seco e verão

chuvoso, apresentando temperatura média anual de 25°C e precipitação média anual de 1116,8 mm com média mensal de 93,1 mm.



Figura 1. Vista/localização da lavoura, Imagem de julho de 2024. Retângulo abaixo da seta. Latitude: 19°34'52" S, Longitude: 41° 22' 59" W, a 270 metros de altitude.

Os genótipos avaliados originaram-se de um programa de seleção participativa realizado entre 2018 e 2019, quando foram identificadas 17 plantas matrizes em lavouras de produtores da região leste mineira, denominados de ST. Esses materiais, propagados vegetativamente por estaquia, foram complementados com genótipos amplamente cultivados no Espírito Santo e Bahia, totalizando 44 acessos para avaliação.

O plantio foi realizado em março de 2020, utilizando delineamento experimental de blocos casualizados com três repetições. Cada parcela experimental foi composta por cinco plantas úteis, totalizando 15 plantas por genótipo. O espaçamento adotado foi de 3,2 x 0,8 metros, correspondendo a

uma densidade de 3.906 plantas por hectare. As práticas de manejo seguiram recomendações técnicas para a cultura do cafeeiro conilon com podas para controle de ramos excessivos, mantendo o padrão de três galhos por planta. A área experimental foi irrigada durante todos os anos.

Foram realizadas avaliações ao longo de quatro safras consecutivas (2022 a 2025), contemplando a produtividade média anual, o período de maturação dos genótipos e atributos físicos dos frutos e grãos. A produtividade foi expressa em sacas de 60 kg de café beneficiado por hectare, obtida a partir da pesagem da produção das parcelas e ajustada conforme o rendimento médio de cada genótipo. As análises dos frutos e grãos abrangeram a porcentagem de grãos e de palha, a relação entre o peso do fruto maduro e o peso seco do grão, a relação entre o volume e o peso fresco do fruto maduro.

A seleção final dos genótipos que irão compor a cultivar proposta (Aimorés) baseou-se no desempenho consistente ao longo de quatro safras consecutivas (2022-2025), considerando critérios de produtividade, estabilidade fenotípica, vigor vegetativo e resistência a estresses bióticos e abióticos. Os clones ST1, ST3, Bicudo, AD1 e A1 destacaram-se não apenas pela produtividade média agregada, mas também pela adaptação às condições edafoclimáticas do Leste Mineiro. A seleção privilegiou genótipos que mantiveram produção estável mesmo sob variações climáticas sazonais, um atributo crucial para a sustentabilidade econômica dos cafeicultores da região.

Tabela 1. Produtividade média anual (sacas de 60 kg ha⁻¹) dos genótipos selecionados para composição da cultivar proposta (Aimorés) ao longo de quatro safras consecutivas.

Genótipos	Prod. ano 1	Prod. ano 2	Prod. ano 3	Prod. ano 4	Prod. Média 4 colheitas	Maturação
	sac ha ⁻¹	sac ha ⁻¹	sacas ha ⁻¹	sacas ha ⁻¹	sacas ha ⁻¹	-
ST1	138,6	117,9	103,4	87,5	111,9	Precoce
ST3	107,2	118,8	74,8	144,3	111,3	Tardio
Bicudo	163,7	108,0	113,8	112,6	124,5	Médio
AD1	172,8	69,0	108,9	137,1	121,9	Precoce
A1	169,5	97,2	135,4	81,5	120,9	Médio
Média - Aimorés					118,1	-
Média dos demais genótipos avaliados					78,6	-

A produtividade média da cultivar proposta foi de 118,1 kg/ha, demonstrando desempenho superior em comparação com a média dos demais genótipos avaliados (78,6 kg/ha). Entre os componentes da Aimorés, os genótipos AD1 (172,8 kg/ha) e A1 (169,5 kg/ha) destacaram-se com os maiores valores de produtividade no primeiro ano, enquanto ST1 (138,6 kg/ha) e Bicudo (163,7 kg/ha) também apresentaram desempenho expressivo. O genótipo ST3 registrou a menor produtividade entre os componentes da cultivar no ano inicial (107,2 kg/ha).

Os resultados demonstram que a cultivar proposta apresenta desempenho produtivo consistentemente superior em condições de cultivo do Leste Mineiro, com um incremento de 50,3% sobre a média dos demais genótipos avaliados. Este ganho produtivo mostrou-se estável ao longo de quatro safras consecutivas, indicando adaptação específica às condições edafoclimáticas da região.

Quando comparada ao desempenho médio nacional do *C. canephora*, estimado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2025) em 53,8 sacas por hectare na safra de 2025, a cultivar proposta apresentou rendimento excepcional. Esse valor corresponde a mais que o dobro da média brasileira para a espécie e supera inclusive a produtividade média registrada no Espírito Santo - maior produtor nacional de Conilon, responsável por 68,9% da safra dessa espécie. Tal desempenho evidencia não apenas a elevada capacidade produtiva da Aimorés, mas também sua notável adaptação às condições edafoclimáticas específicas da região, posicionando-a como alternativa altamente competitiva frente às cultivares já consolidadas no mercado.

Em Minas Gerais, de acordo com o 3º Levantamento da Safra de Café – 2025 (Conab, 2025), a produtividade média do *C. canephora* foi de 51,7 sacas por hectare nas regiões da Zona da Mata, Rio Doce e Central, e de 41,0 sacas por hectare no Norte, Jequitinhonha e Mucuri, representando aumentos de 58,0% e 25,4%, respectivamente, em relação à safra de 2024. Frente a esses indicadores, a cultivar proposta manteve produtividade mais de duas vezes superior à melhor média regional do estado, reforçando seu potencial agrônomo e a eficiência de sua adaptação às condições locais.

A cultivar proposta apresentou percentual médio de grão de 54,97%, ligeiramente superior à média dos demais genótipos (54,60%). Entre os componentes da cultivar, ST1 destacou-se com o maior teor de grão (59,51%), enquanto ST3 registrou o menor percentual (48,08%). Em relação à palha, a Aimorés obteve média de 45,03%, valor próximo ao observado nos demais genótipos (45,40%), com ST3 apresentando o maior conteúdo de palha (51,92%) e ST1 o menor (40,49%). Além disso, não foi verificado ataque severo das principais pragas e doenças, com as plantas mantendo-se vigorosas e com bom enfolhamento.

A relação peso do fruto/peso do grão da Aimorés foi de 4,062, valor próximo ao dos demais genótipos (4,127). ST3 e Bicudo apresentaram as maiores relações (4,642 e 4,610, respectivamente), indicando frutos mais pesados em relação ao grão. Na relação volume/peso do fruto, a Aimorés registrou 1,577, equivalente à média dos demais genótipos (1,583), com A1 e ST3 mostrando os maiores valores (1,661 e 1,652) e Bicudo o menor (1,435).

Tabela 2. Algumas características do fruto e dos grãos, dos genótipos que compõe a cultivar proposta (Aimorés).

Genótipos	Grão	Palha	Peso maduro do Fruto/Peso Seco do grão	Volume maduro/Peso maduro do fruto
	%	%	Relação	Relação
ST1	59,51	40,49	3,496	1,632
ST3	48,08	51,92	4,642	1,652
Bicudo	54,27	45,73	4,610	1,435
AD1	56,54	43,46	3,607	1,507
A1	56,46	43,54	3,955	1,661
Média				
Aimorés	54,97	45,03	4,062	1,577
Média dos demais	54,60	45,40	4,127	1,583

A cultivar proposta consolida-se como uma alternativa genética superior para a diversificação varietal na cafeicultura do Leste Mineiro, região que vem experimentando significativa expansão na cultura de Conilon. Desenvolvida especificamente para condições de baixa altitude (inferior a 600 metros), apresenta características agronômicas desejáveis, com destaque para a alta produtividade nas condições edafoclimáticas da região oriental de Minas Gerais. Sua combinação de adaptação regional, tolerância a estresses abióticos e estabilidade produtiva confere grande potencial de aceitação entre

os cafeicultores, podendo ser cultivada em condições climáticas similares às do seu desenvolvimento (aproximadamente 300 metros de altitude).

Além da recomendação prioritária para o Leste Mineiro, a cultivar demonstra potencial para cultivo em outras regiões de Minas Gerais, Espírito Santo e Bahia, desde que mantidas as condições de altitude inferior a 600 metros. Este trabalho pioneiro de avaliação varietal para o Leste Mineiro reforça a importância de programas de melhoramento genético regionalizados que considerem as interações genótipo-ambiente específicas, garantindo o desenvolvimento de cultivares adaptadas às particularidades de cada território produtor.

Área experimental e parte da equipe



CAPÍTULO 3

Impacto das Mudanças Climáticas na Agricultura do Espírito Santo

Neyval Costa Reis Junior

Pedro Henrique Pantoja

Jane Méri Santos

Fábio Luiz Partelli

1. Introdução

No Brasil, o ano de 2024 foi o mais quente desde 1961, segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A temperatura média nacional atingiu 25,02°C, valor 0,79°C acima da normal climatológica de 1991–2020 (24,23°C) (WMO, 2025). Em diversos municípios foram observadas máximas superiores a 43°C. Além do calor extremo, o país enfrentou chuvas intensas, enchentes, secas, incêndios florestais e episódios de poluição atmosférica, com impactos econômicos expressivos e elevado número de óbitos.

Desde a década de 1970, o aquecimento da superfície terrestre tem ocorrido em ritmo mais acelerado do que em qualquer outro intervalo de 50 anos nos últimos dois milênios (IPCC, 2021). As ondas de calor se tornaram mais frequentes e intensas, enquanto os episódios de frio severo se reduziram. Paralelamente, registram-se estiagens prolongadas e precipitações intensas com maior regularidade, ampliando os riscos de inundações e secas.

No Espírito Santo, simulações realizadas com o modelo regional Eta-CPTEC em alta resolução (5 km) revelam uma tendência de aquecimento significativo quando comparado ao período de referência 1961–1990. As estimativas apontam elevação de 2,5°C a 3,5°C em cenários de emissões moderadas, podendo chegar a até 6°C sob condições extremas até a década de 2080 (Soares, 2023).

Essas alterações repercutem diretamente no ciclo hidrológico. Meira-Neto et al. (2023), ao avaliar a bacia do rio Doce em cenários de altas emissões, identificaram queda substancial nas precipitações médias anuais e sazonais, com consequente redução das vazões médias (Qmed) e das vazões de permanência (Q90). Tais efeitos tendem a agravar os períodos de estiagem, principalmente no norte do estado, onde os dias consecutivos sem chuva podem ultrapassar 70, em comparação ao histórico de 1961–1990 (Soares, 2023).

A agricultura Capixaba representa cerca de 5% do PIB estadual e o agronegócio um PIB superior a 30%, portanto, são altamente sensíveis a essas mudanças. O setor é diversificado, abrangendo avicultura, aquicultura, pipericultura, fruticultura e cafeicultura. O café é cultivado em 61 dos 78 municípios, sendo a principal atividade agrícola do estado. Estudos apontam que o aquecimento pode comprometer o café conilon, com redução no crescimento vegetativo, formação de flores estéreis e queda na produção e qualidade dos frutos (Oliveira et al., 2023). Esse cenário pode levar à migração do cultivo para áreas de maior altitude, além de afetar outras culturas importantes, como pimenta-do-reino, banana e mamão.

Com o avanço das mudanças climáticas, os impactos sobre a agricultura do Espírito Santo tendem a se intensificar, exigindo políticas públicas consistentes e estratégias de adaptação para garantir a resiliência do setor.

2. Projeções Climáticas Futuras para o Espírito Santo

A análise de cenários futuros é fundamental para compreender como as mudanças globais do clima podem afetar de forma específica no território Capixaba. As projeções permitem antecipar tendências de aquecimento, alterações no regime de chuvas, maior frequência de eventos extremos e mudanças na disponibilidade de água, fornecendo subsídios essenciais para o planejamento e a formulação de políticas públicas.

As projeções apresentadas aqui foram derivadas de modelos globais do CMIP6, selecionados segundo critérios de desempenho estatístico aplicados ao Brasil (Alves, 2023). Esses dados foram ajustados por meio do conjunto de dados observados BR-DWGD (Xavier et al., 2022), que reúne informações meteorológicas históricas interpoladas em alta resolução espacial. Para assegurar consistência entre os modelos e reduzir vieses sistemáticos, aplicou-se o método delta aditivo (Maraun, 2016). Esse procedimento aumenta a confiabilidade das estimativas de precipitação e temperatura que fundamentam a avaliação de vulnerabilidades e riscos climáticos no ES.

As projeções são expressas em termos de anomalias, ou seja, desvios em relação ao valor médio observado em um período de referência. No presente estudo, adotou-se como base o intervalo histórico 1995–2014, apresentado na Figura 1. Assim, por exemplo, uma anomalia positiva de 2°C para a temperatura máxima em determinado município entre 2020-2040 indica que a média projetada para esse intervalo supera em 2°C o valor observado no período de referência. Esse recurso analítico é fundamental para destacar tendências de aquecimento, redução ou aumento de chuvas e intensificação de eventos extremos, facilitando a comparação espacial e temporal.

De forma geral, os modelos climáticos ajustados à realidade Capixaba apontam para aumento contínuo da temperatura média ao longo do século XXI. Sob o cenário otimista (SSP2-4.5), o acréscimo pode chegar a 2°C até

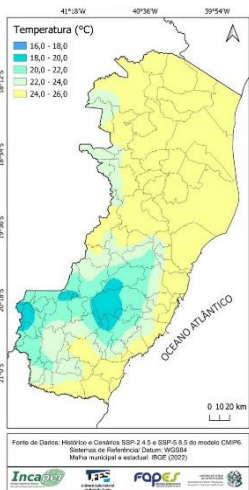
2100 em comparação ao período de referência, enquanto no cenário pessimista (SSP5-8.5) o aumento ultrapassa 4°C. As maiores anomalias concentram-se no litoral sul e em áreas do norte do estado. As projeções de temperatura máxima indicam que, no pior cenário, os valores podem superar 43°C, especialmente no sudoeste Capixaba (Figura 2).

No que se refere à precipitação, a climatologia de referência mostra volumes anuais acima de 1000 mm em praticamente todo o estado, com valores mais baixos no nordeste (Figura 1). As projeções indicam redução nos totais anuais de chuva em ambos os cenários, sendo a queda mais pronunciada justamente no nordeste, região onde já existem problemas recorrentes de seca. Em alguns locais, os valores podem diminuir em até 60% ao longo do século, levando os totais anuais para próximo de 400 mm (Figura 3).

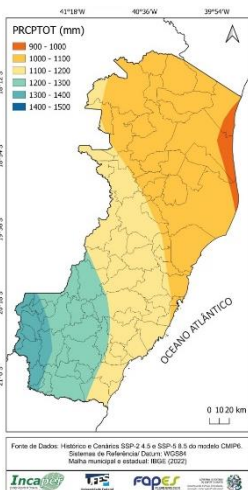
O índice CDD, que mede a duração de períodos secos, tende a aumentar em todo o estado. Atualmente, as médias variam entre 22 e 29 dias (Figura 1), mas no cenário SSP5-8.5 podem chegar a 65 dias consecutivos sem chuva (Figura 4). Já o índice CWD, que expressa o número de dias seguidos com precipitação, apresenta leve tendência de redução, com alta variabilidade anual. Mesmo assim, em alguns anos os valores ainda podem alcançar 18 dias consecutivos.

As projeções para os índices de precipitação extrema mostram intensificação dos episódios de chuva intensa. O Rx1day, associado a inundações urbanas, deve apresentar anomalias positivas na maior parte do estado, alcançando até 94 mm em regiões do litoral centro-sul (Fig 6). Quanto ao Rx5day, ligado a deslizamentos, a tendência média é de redução, mas há possibilidade de picos de aumento, principalmente no sudeste Capixaba.

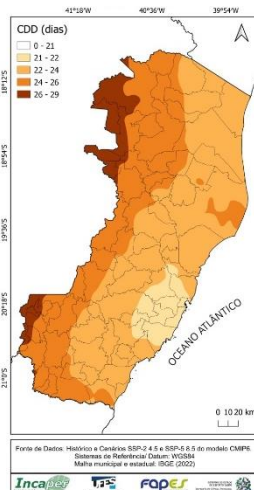
A leitura conjunta desses resultados aponta para um futuro climático mais quente, com secas prolongadas, menor disponibilidade hídrica e chuvas mais concentradas em episódios extremos, impondo desafios consideráveis à agricultura, aos recursos hídricos e à infraestrutura do Espírito Santo.



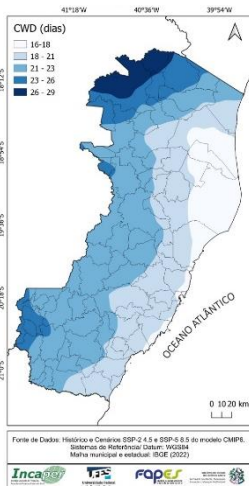
(a)



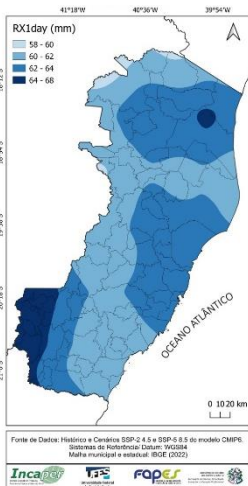
(b)



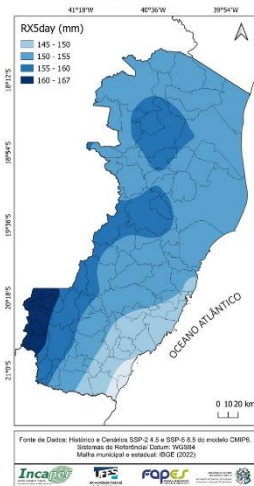
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 1. Climatologia média histórica entre 1995 e 2014: (a) temperatura média anual, (b) precipitação total (PRCTOT); (c) dias consecutivos sem chuva (CDD), (d) dias consecutivos com chuva (CWD), (e) máxima precipitação anual em 1 dia consecutivos (Rx1day), (f) máxima precipitação anual em 5 dias consecutivos (Rx5day).

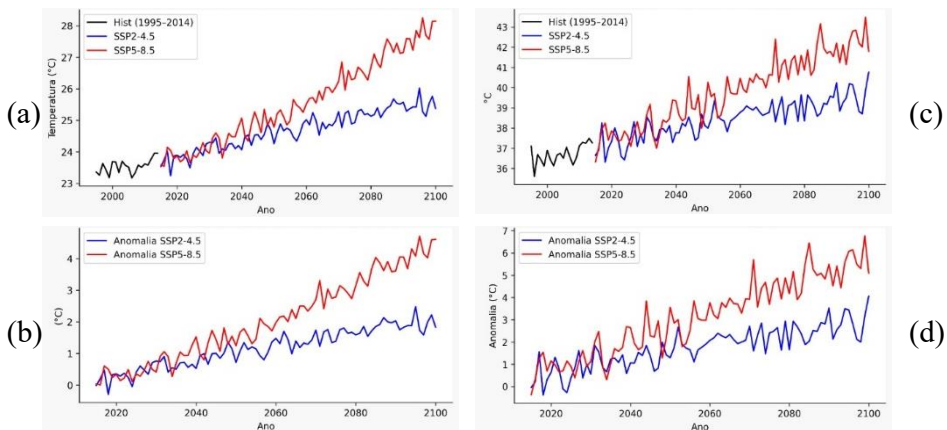


Figura 2. Projeções futuras para o ES de (a) temperatura média anual, (b) anomalia da temperatura média anual, (c) projeção de temperatura máxima anual, (d) anomalia da temperatura máxima, para os cenários otimista (SSP2 4.5) e pessimista (SSP5 8.5).

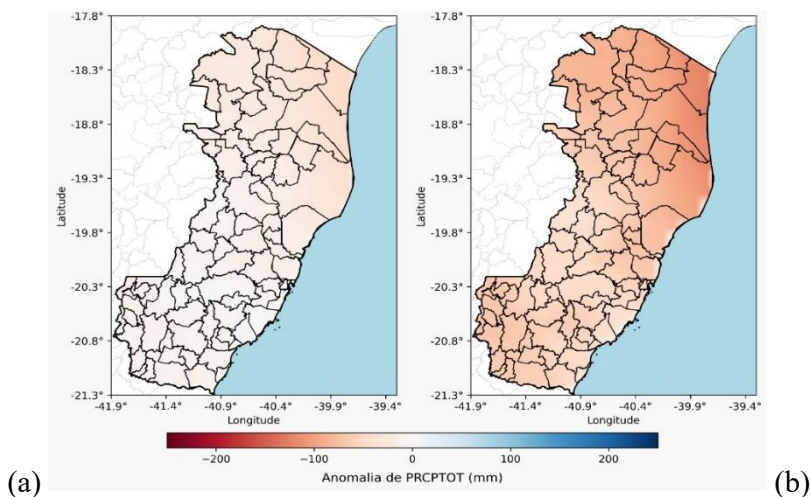


Figura 3. Anomalias médias de precipitação total anual (PCPROT) em relação à média histórica entre 1995 e 2015 para os cenários futuros (a) otimista (SSP2 4.5) e (b) pessimista (SSP5 8.5).

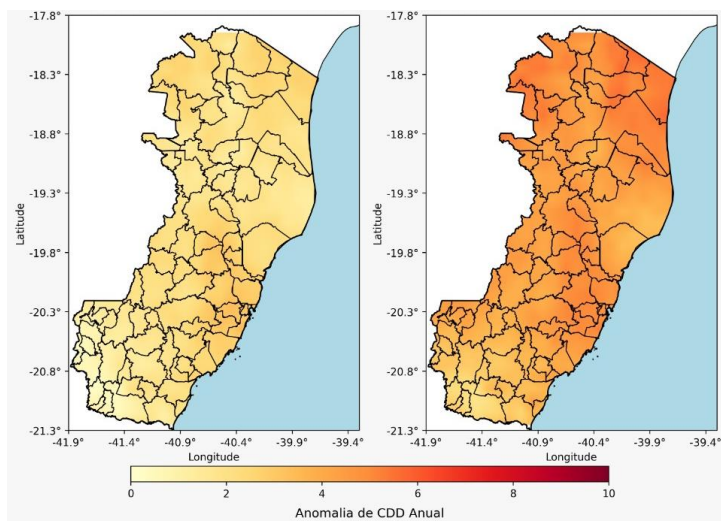


Figura 4. Anomalias médias de temperatura média em relação à média histórica entre 1995 e 2014 para os cenários futuros (a) otimista (SSP2 4.5) e (b) pessimista (SSP5 8.5).

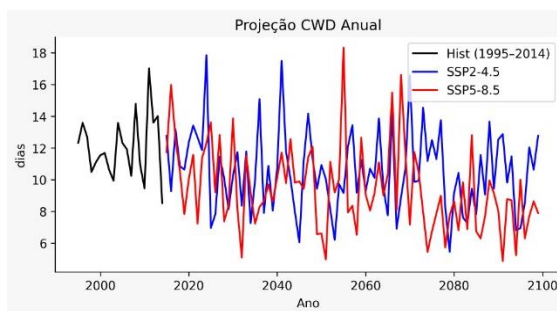


Figura 5. Projeção do número de dias seguidos com precipitação (CWD) para os cenários futuros (a) otimista (SSP2 4.5) e (b) pessimista (SSP5 8.5).

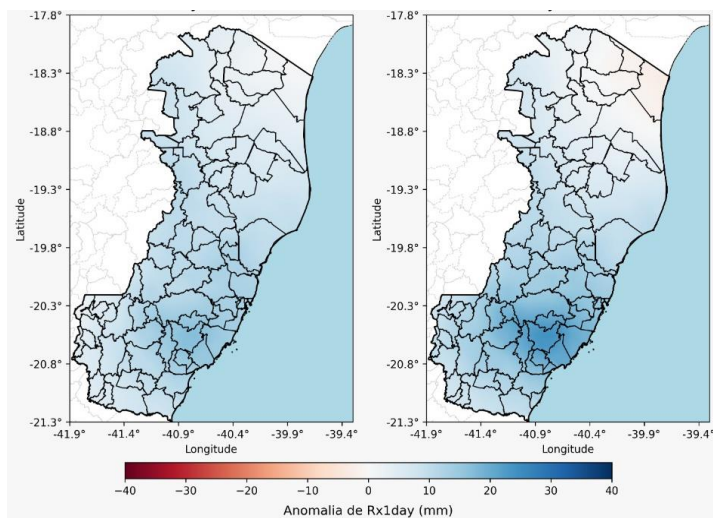


Figura 6. Anomalias médias de máxima precipitação em 1 dia (Rx1day) em relação à média histórica entre 1995 e 2014 para os cenários futuros (a) otimista (SSP2 4.5) e (b) pessimista (SSP5 8.5).

3. Impactos das Mudanças Climáticas na Agricultura do Espírito Santo

O aumento da temperatura média do ar, a intensificação das ondas de calor, a maior frequência de secas prolongadas e a ocorrência recorrente de enchentes devem repercutir de forma expressiva, direta e indireta, na agropecuária e na silvicultura do Espírito Santo, afetando a produtividade, a qualidade dos produtos e a sustentabilidade das atividades rurais.

O Plano Estratégico de Desenvolvimento da Agricultura (PEDEAG-4, 2023–2032) reconhece que o setor agrícola tem papel relevante não apenas na adaptação, mas também na mitigação das mudanças climáticas, seja pela redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), seja pelo sequestro de carbono. Nesse contexto, o Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono) foi incorporado ao Plano Estadual de Descarbonização e Neutralização de GEE, reforçando a integração entre políticas setoriais. Além

disso, o PEDEAG-4 prevê iniciativas específicas de adaptação, como: (i) ampliar o sistema de monitoramento agrometeorológico estadual; (ii) investir em pesquisa e desenvolvimento de materiais genéticos mais tolerantes ao estresse climático; (iii) utilizar o zoneamento climático como ferramenta para orientar o uso da terra agrícola em cenários futuros; e (iv) estimular tecnologias que aumentem a eficiência no uso da água.

É a primeira vez que um plano estratégico estadual de agricultura aborda de forma explícita os impactos das mudanças climáticas sobre o setor. Entre os temas transversais avaliados, o clima aparece com peso significativo, posicionado logo após os eixos “educação, pesquisa e extensão” e “agricultura familiar”.

O Espírito Santo já convive com o problema das pastagens degradadas, sobretudo em municípios situados em áreas de características semiáridas. Em 2021, a redefinição dos limites do Semiárido brasileiro incluiu parte do norte Capixaba, onde os cenários climáticos projetam aumento da duração das estiagens. A nova delimitação foi estabelecida pela Resolução nº 150/2021 do Conselho Deliberativo da Sudene e confirmada posteriormente pela Resolução nº 176/2024, que manteve nessa classificação os municípios de Baixo Guandu, Ecoporanga, Itaguaçu, Itarana, Mantenópolis e Montanha.

Entre as metas do PEDEAG-4 estão a redução significativa das áreas de pastagens degradadas, a recuperação das Áreas de Preservação Permanente (APPs), a ampliação das florestas plantadas e a adoção de sistemas integrados de produção agrícola, florestal e pecuária. Outra meta relevante é a expansão da agricultura irrigada: o plano pretende elevar de 43,3% para 55% o número de propriedades irrigadas até 2032, o que pressupõe a necessidade de ampliar substancialmente a capacidade de armazenamento de água no estado. Contudo, as projeções climáticas apontam para redução na disponibilidade hídrica, criando um paradoxo entre a necessidade de maior irrigação e a tendência de escassez de recursos hídricos.

Plantas e animais necessitam de faixas adequadas de temperatura para crescer e se desenvolver. A exposição a extremos térmicos provoca estresse fisiológico que, no caso das plantas, compromete a fotossíntese e reduz a produtividade (Rodrigues et al., 2016; Martins et al., 2024). No Espírito Santo, há registros concretos: em 2017, ondas de calor causaram abortamento de flores na pimenta-do-reino, com queda expressiva da produção (G1, 2024c), enquanto em 2023 a cafeicultura conilon registrou perdas de aproximadamente 30% devido a altas temperaturas. A Organização Meteorológica Mundial define ondas de calor como períodos em que a temperatura máxima diária excede em pelo menos 5 °C a climatologia de referência por seis dias ou mais, condição cada vez mais comum no estado.

Embora a maioria dos cultivos seja realizada a pleno sol, sistemas de sombreamento despontam como alternativa promissora de adaptação ao aquecimento. O cultivo sombreado reduz o estresse térmico, melhora a conservação do solo e favorece a biodiversidade (Salvador et al., 2024). Em especial, os sistemas agroflorestais têm mostrado benefícios como redução da temperatura média do ambiente, melhoria da qualidade do solo e diversificação produtiva (Dobo et al., 2018; Oliveira et al., 2018; Pezzopane et al., 2010). Contudo, ainda há lacunas científicas quanto à intensidade ideal de sombreamento e à escolha das espécies arbóreas para diferentes cultivos.

A escassez de água representa outro desafio crítico. A água é indispensável para os processos metabólicos das plantas, e sua falta pode levar à morte de folhas ou de toda a lavoura. No Espírito Santo, a irrigação tem sido a principal estratégia de enfrentamento do déficit hídrico, sobretudo no norte do estado. Entretanto, essa prática exige investimentos em infraestrutura, disponibilidade hídrica e alto consumo de energia.

O histórico recente confirma a vulnerabilidade hídrica do estado. A seca de 2014–2015, considerada uma das mais severas já registradas, afetou praticamente todas as cadeias agropecuárias Capixabas. As perdas

ultrapassaram R\$ 3,5 bilhões, impactando diretamente a cafeicultura, a pimenta-do-reino e a pecuária (ALES, 2024; G1, 2024a, 2024b). Mesmo lavouras irrigadas foram prejudicadas, já que barragens e cursos d'água secaram em decorrência da falta prolongada de chuvas. Atualmente, se considerar uma quebra de 50% na safra de café, considerando os preços praticados em 2024, representaria perdas próximas a R\$ 10 bilhões, evidenciando o peso econômico da variabilidade climática.

Por outro lado, chuvas intensas e inundações também afetam a produção. A maioria das culturas não resiste a mais de dois ou três dias de encharcamento do solo, devido à falta de oxigênio nas raízes, condição que leva ao estresse fisiológico e, muitas vezes, à morte das plantas. Além disso, as enchentes podem provocar danos estruturais nas áreas agrícolas, incluindo erosões, desmoronamentos, perdas de infraestrutura e até óbitos de animais e pessoas.

Historicamente, o Espírito Santo tem enfrentado enchentes severas que impactaram tanto áreas rurais quanto urbanas. A adoção de práticas conservacionistas de manejo do solo, o aumento da infiltração de água e o fortalecimento da capacidade de armazenamento hídrico são medidas essenciais para reduzir os danos. Entre as alternativas estão o plantio de árvores, a construção de caixas secas, terraços, barraginhas e barragens, que contribuem para aumentar a resiliência das propriedades rurais diante da intensificação das mudanças climáticas.

4. Conclusão

As projeções climáticas para o Espírito Santo indicam um futuro marcado por elevação significativa da temperatura média, redução nos volumes anuais de precipitação e maior frequência de extremos, como secas prolongadas e chuvas intensas. Esse quadro tende a intensificar pressões sobre a agricultura, setor que representa não apenas uma atividade econômica

estratégica, mas também elemento central da identidade social e cultural do estado.

A análise mostra que a combinação entre aumento de temperatura, irregularidade hídrica e ocorrência de eventos extremos poderá comprometer a produtividade agrícola, sobretudo do café conilon, principal cultura Capixaba. A experiência da seca de 2014–2015 e das ondas de calor de 2017 e 2023/2024 ilustram a vulnerabilidade da produção, com perdas econômicas bilionárias e impactos diretos sobre a subsistência de milhares de agricultores familiares.

Modelos regionais e globais indicam que até 2100 a temperatura média no Espírito Santo poderá subir de 2°C a 4°C, dependendo do cenário de emissões. O norte e o litoral sul do estado concentram as maiores anomalias de aquecimento. A precipitação tende a se reduzir de forma significativa, sobretudo no nordeste, com possibilidade de queda de até 60% nos totais anuais. O número de dias consecutivos sem chuva pode dobrar, alcançando até dois meses no cenário mais pessimista. Em contrapartida, espera-se aumento de chuvas intensas em curtos períodos, ampliando o risco de enchentes e deslizamentos.

Essas alterações trazem sérios desafios para a agropecuária Capixaba. O Plano Estratégico de Desenvolvimento da Agricultura (PEDEAG 2023–2032) já incorpora ações de adaptação, incluindo zoneamento climático, pesquisa de variedades mais resistentes, ampliação da irrigação eficiente e recuperação de pastagens. Alternativas como sistemas agroflorestais, sombreamento e manejo integrado da água surgem como estratégias promissoras para aumentar a resiliência da agricultura Capixaba.

Ao mesmo tempo, o estado dispõe de instrumentos institucionais importantes, como o PEDEAG-4 (2023–2032), que incorpora de forma inédita diretrizes de adaptação e mitigação às mudanças climáticas no setor agrícola. Entre as medidas previstas estão o fortalecimento do monitoramento

agrometeorológico, o desenvolvimento de variedades mais tolerantes ao estresse climático, a expansão de tecnologias para uso eficiente da água, a recuperação de áreas degradadas e o incentivo a práticas sustentáveis, como os sistemas agroflorestais e a integração lavoura-pecuária-floresta.

A vulnerabilidade da agricultura Capixaba é agravada pelo predomínio de pequenas propriedades rurais, com recursos limitados para implementar medidas adaptativas. Isso reforça a importância de políticas públicas integradas, que ampliem o acesso a crédito, assistência técnica e tecnologias adaptativas, assegurando que tanto grandes produtores quanto agricultores familiares possam enfrentar os desafios climáticos.

Referências

- ALES – Assembleia Legislativa do Espírito Santo. **Crise hídrica derrubou agricultura capixaba em 2015.** Disponível em: <https://www.al.es.gov.br/Noticia/2016/01/29834/crise-hidrica-derrubou-agricultura-capixaba-em-2015.html> Acesso em: 17 de outubro de 2024.
- Alves, M. L. Avaliação de desempenho de modelos climáticos para o Brasil. Relatório Técnico-Científico (**Produto V e Produto VI do Projeto AdaptaBrasil MCTI**). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2023.
- Dobo, B., Asefa, F., Asfaw, Z. Effect of tree-enstet-coffee based agro-forestry practices on arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) species diversity and spore density. **Agro-forestry Systems**, 92, 525-540, 2018
- G1. **Seca faz produção cair até 70% no Espírito Santo.** Disponível em: <https://g1.globo.com/espirito-santo/agronegocios/noticia/2016/10/seca-faz-producao-cair-ate-70-no-espirito-santo.html> Acesso em: 17 de outubro de 2024a.
- G1. **Seca fez produção de café cair em 50% em 2015, no ES.** Disponível em: <https://g1.globo.com/espirito-santo/agronegocios/noticia/2016/01/seca-fez-producao-de-cafe-cair-em-50-em-2015-no-es.html> Acesso em: 17 de outubro de 2024b.
- G1. **Sol forte e falta de chuva comprometem produção de pimenta-do-reino no ES.** Disponível em: <https://g1.globo.com/espirito-santo/noticia/sol-forte-e-falta-de-chuva-comprometem-producao-de-pimenta-do-reino-no-es.ghtml> Acesso em: 17 de outubro de 2024c.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Masson-delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A.; Connors, S. L.; Péan, C.; Berger, S.; Caud, N.; Chen,

- Y.; Goldfarb, L.; Gomis, M. I.; Huang, M.; Leitzell, K.; Lonnoy, E.; Matthews, J. B. R.; Maycock, T. K.; Waterfield, T.; Yelekçi, O.; Yu, R.; ZHOU, B. (Eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2021. 2391 p. DOI: 10.1017/9781009157896.
- Maraun, D. Bias correcting climate change simulations - a critical review. **Current Climate Change Reports**, 2, 211-220, 2016.
- Martins, J.I., Rodriguesa, A.P., Marques, I., Leita, A.E., Pais, E.P., Semedo, J.N., Partelli, F.L., Rakočević, M., Lidon, F.C., Ribeiro-Barrosa, A.I., Damatta, F.M., Ramalho, J.C. Ecophysiological responses of coffee plants to heat and drought, intrinsic resilience and the mitigation effects of elevated air [CO₂] in a context of climate changes. **Advances in Botanical Research**, Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2024.
- Meira-Neto, A. A., Costa, F. P. D., Buarque, D. C, Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos, In: Reis, N. C., Nobre, C. A., Santos, J. M., Pezzopane, J. E. M. (Org), **Mudanças Climáticas: Efeitos sobre o Espírito Santo**, Paco Editorial, 2023, p. 71-110.
- Oliveira, M. G., Martins, M. Q., Partelli, F.L., Mudanças Climáticas e Agricultura no Espírito Santo, In: Reis, N. C., Nobre, C. A., Santos, J. M., Pezzopane, J. E. M. (Org), **Mudanças Climáticas: Efeitos sobre o Espírito Santo**, Paco Editorial, 2023, p. 145-176.
- Oliveira, Marcos Góes et al. Physiological responses of photosynthesis in black pepper plants under different shade levels promoted by intercropping with rubber trees. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, n. 5, p. 513-526, 2018.
- Pezzopane, J. R. M. Al. Zoneamento de risco climático para a cultura do café conilon no Estado do Espírito Santo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 3, p. 341-348, 2010.
- Rodrigues, W.P., Martins, M.Q., Fortunato, A.S., Rodrigues, A.P., Semedo, J.N., Simões-Costa, M.C., et al. Long-term elevated air [CO₂] strengthens photosynthetic functioning and mitigates the impact of supra-optimal temperatures in tropical *Coffea arabica* and *Coffea canephora* species. **Global Change Biology**, 22, 415–431, 2016.
- Salvador, H.P.; Berilli, A.P.C.G.; Rodrigues, W.P.; Mazzafera, P.; Partelli, F.L. A climate change perspective on the selection, development, and management of *Coffea canephora* genotypes. **Advances in Botanical Research**, Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2024.
- Soares, W. R., Projeções Climáticas para o Espírito Santo, In: Reis, N. C., Nobre, C. A., Santos, J. M., Pezzopane, J. E. M. (Org), **Mudanças Climáticas: Efeitos sobre o Espírito Santo**, Paco Editorial, 2023, p. 41-70.

CAPÍTULO 04

Influência do estresse na predisposição do cafeeiro às doenças abióticas

Antonio Fernando de Souza

Ellen Vieira da Silva

Julia Sperandio Schulz

Maysa Bromerschenkel da Silva

Marcelo Barreto da Silva

1. Introdução

O cafeeiro é uma planta perene pertencente ao gênero *Coffea*, o qual abriga diversas espécies, dentre as quais *C. arabica* L. (café arábica) e *C. canephora* Pierre ex. A. Froehner (café conilon/robusta) são as mais importantes economicamente. No Espírito Santo, segundo maior produtor nacional de café, é cultivado ambas as espécies.

Diversos insetos-praga e/ou doenças ocorrem nas lavouras de café arábica e conilon. Muitos desses problemas são conhecidos, o que torna o diagnóstico mais rápido e tomadas de decisões mais precisas quanto ao manejo. Outros, porém, exigem que as lavouras sejam visitadas, amostras de órgãos das plantas sintomáticas sejam coletadas e enviadas para especialistas auxiliarem na identificação da causa exata do problema.

Em muitos casos, os sintomas apresentados nas lavouras não são causados por agentes bióticos (ou seja, por organismos vivos e transmissíveis

de uma planta doente/infestada para outra sadia), mas decorrem de condições ambientais adversas ou da aplicação de práticas culturais equivocadas.

Segundo Agrios (2005) doença de plantas é conceituada como “*o mal funcionamento de células e tecidos do hospedeiro causada pela irritação contínua por um agente patogênico ou fator ambiental e que resulta no desenvolvimento de sintomas*”. Nesse contexto, fatores de ambiente que alteram processos fisiológicos e induzem sintomas nas plantas são enquadrados como agentes causais abióticos de doenças e não são transmissíveis de uma planta para outra.

Os problemas abióticos vêm se intensificando no cafeeiro nos últimos anos, como respostas às mudanças climáticas globais ou como respostas aos estresses fisiológicos ocasionados por práticas culturais inadequadas com vistas à obtenção de maiores produtividades nas lavouras.

Entre 2015 e 2023, o Laboratório de Diagnose de Doenças de Plantas do Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Santa Teresa recebeu e analisou 316 amostras de diferentes espécies vegetais para realizar a diagnoses dos agentes causais. Dessas, 98 amostras vieram de lavouras de café arábica ou conilon. Os problemas de natureza abiótica representaram 43,9% das amostras de café analisadas e 13,6% do total de amostras de plantas em geral diagnosticadas (Tabela 1).

Após análise e conclusão dos diagnósticos, observou-se que tais problemas eram decorrentes do uso de clones não adaptados aos locais de cultivo; do plantio de mudas “passadas” com sistemas radiculares defeituosos; de erros básicos na implantação de lavouras (danos nas raízes das mudas no momento do plantio; do afogamento de mudas; de plantios de mudas sem cortar o fundo da sacola; substrato de enchimento das sacolas feito com solo muito argiloso e sem adição de matéria orgânica); do manejo inadequado das adubações de plantio e/ou de produção; do estresse hídrico/manejo

inadequado da irrigação; de aplicações ou misturas indevidas de agrotóxicos e do excesso de insolação associado a altas temperaturas.

Tabela 1. Problemas abióticos do cafeeiro diagnosticados em plantas de café conilon e arábica no Ifes Campus Santa Teresa entre 2015 e 2023.

	Amostras Recebidas	Amostras de Cafeeiros	Problemas Abióticos Diagnosticados
2015	9	5	4
2016	15	3	1
2017	29	8	2
2018	28	10	4
2019	105	33	11
2020	13	5	2
2021	2	0	0
2022	53	17	6
2023	62	17	13
	316	98	43

Em diversas amostras, além dos distúrbios de origem abiótica, *Rhizoctonia* sp. e *Fusarium* spp. foram frequentemente relacionados ao afogamento de mudas, enquanto nematoides dos gêneros *Pratylenchus* sp. e *Meloidogyne* sp. estiveram vinculados a sistemas radiculares defeituosos e necrosados. Também se constatou elevada incidência de *Cercospora coffeicola* em plantas com deficiência nutricional e de antracnose em clones de café conilon cultivados em regiões de Santa Teresa caracterizadas por alta frequência de chuvas.

Nas amostras em que foram identificadas a presença de agentes biótico e abiótico, a grande dúvida foi quanto a causa primária do problema, para que assim fossem direcionadas medidas efetivas de manejo.

A seguir, apresentaremos alguns fatores de ambiente que induzem estresses fisiológicos em lavouras de café do Espírito Santo.

2. Principais estresses fisiológicos que predispõem o cafeeiro a doenças abióticas.

2.1. Má formação do sistema radicular das mudas e plantas adultas:

O sistema radicular exerce papel importante na fisiologia do cafeeiro, pois além de promover a fixação da planta ao solo, é responsável pela absorção de água e de nutrientes. Quaisquer fatores que afetem a sua formação e arquitetura podem trazer impactos na relação raiz/parte aérea, com efeitos significativos no particionamento de carboidratos, no crescimento de raízes, no lançamento de folhas e ramos, bem como na produtividade do cafeeiro.

Muitas deformidades radiculares ocorrem durante a formação das mudas e/ou plantio em campo. A Instrução Normativa nº 35 de 29 de novembro de 2012 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, estabelece as normas para a produção e comercialização de material de propagação de cafeeiro no Brasil. No Artigo 31 está estabelecido a obrigatoriedade do responsável técnico determinar o percentual de raízes tortas em amostras de mudas coletadas na fase da pré-comercialização e emitir o termo de conformidade com base em análise visual. A tolerância máxima em uma subparcela amostrada é de 5% de mudas com raízes defeituosas.

Os defeitos observados têm diversas origens. Mudanças produzidas a partir de estacas e mantidas por longos períodos em recipientes (sacolas, tubetes, biopotes) alteram a conformação do sistema radicular gerando raízes enoveladas e/ou com crescimento lateral. Quando plantadas em campo, darão origem a plantas com sistema radicular superficial, com baixa capacidade de explorar o perfil do solo para absorção de água e nutrientes. Em condições de adversidades climáticas, apresentarão enrolamento de folhas, murcha, deficiência pontual ou generalizada de nutrientes e seca de ramos plagiotrópicos. Em casos mais extremos, ocorrerá a morte de hastes ortotrópicas, especialmente em anos de altas cargas produtivas.

Mudas produzidas em sacolinha preenchidas com substrato à base de solo muito argiloso e ausência de matéria orgânica, também podem resultar em raízes enoveladas e/ou defeituosas. Quando plantadas em campo, elas apresentarão crescimento reduzido, amarelecimento e seca de ramos. Mesmo após alguns anos do transplântio, quando arrancadas das covas, o substrato argiloso permanece aderido em sua base, indicando a gênese do problema.

A ocorrência de raízes defeituosas também ocorre como consequência de erros cometidos durante o plantio, como não cortar as pontas das raízes (fundo das sacolas), compactar a cova no ato de inserir a muda no solo, realizar plantio em covas pouco profundas e/ou com impedimentos químicos ou físicos.

Nos últimos anos temos acompanhado uma evolução tecnológica no setor de produção de mudas de café no Estado, por meio do uso dos biopotes, que além do aspecto sanitário, melhora a qualidade das mudas e reduz etapas de trabalho entre o viveiro e o campo. Entretanto, faltam pesquisas de longa duração para validar a tecnologia na cafeicultura capixaba. Dimensões inadequadas e/ou má qualidade de determinados tipos papéis utilizados na confecção do biopote está influenciando a arquitetura do sistema radicular das mudas e consequentemente das plantas em campo. Ressalta-se ainda, que após os transplântio, mudas produzidas em biopotes exigem maior acompanhamento dos agricultores quanto aos aspectos hídricos e nutricionais. Caso não sejam dadas a atenção necessária, as plantas sofrerão estresses fisiológicos pós-plantio.

2.2. “Afogamento” de mudas/plantas:

O “afogamento” refere-se ao plantio profundo de mudas com o solo ultrapassando a região do coleto da planta em vários centímetros. Anatomicamente, os tecidos do caule não são adaptados para permanecer em contato direto com o solo. Quaisquer danos ou ferimentos nessa região, abre

portas de entrada para diversos tipos de microrganismos, os quais penetrarão os tecidos e causarão necroses e mortes da casca, afetando a translocação de fotoassimilados para as raízes. Sem a chegada de fotoassimilados, o crescimento e funcionamento do sistema radicular fica comprometido e a parte aérea é severamente afetada com sintomas reflexos de murcha, amarelecimento, seca de ramos plagiotrópicos e morte de ramos ortotrópicos. Na região necrosada isola-se, com frequência, fungos do gênero *Fusarium* e *Rhizoctonia*, considerados como agentes secundários na causa desse problema.

Tais sintomas são frequentes em plantios realizados por pessoas inexperientes ou plantio feito em áreas declivosas com a movimentação de solo para a base das plantas. O manejo desse problema é muito difícil no campo e, em alguns casos, exigirá a remoção com enxada do solo acumulado na base das plantas e a manutenção do mato nas entrelinhas. Em casos de incidência elevada, recomenda-se o arranquio das plantas e o replantio de novas mudas na área.

2.3. Estresses abióticos ligados a causas nutricionais.

A planta de café, para desenvolver e produzir frutos, precisa que os nutrientes essenciais sejam fornecidos em quantidades suficientes para suprir as demandas nutricionais exigidas em suas diferentes fases fenológicas.

A deficiência ou excesso de nutrientes leva à predisposição do cafeeiro a doenças crônicas, uma vez que importantes biomoléculas, como clorofila, DNA, proteínas, lipídios e metabólitos secundários deixam de ser sintetizados. Além disso, adubações desequilibradas predispõe o cafeeiro a maior intensidade de doenças. Os sintomas de deficiência nutricional no cafeeiro são variados e depende do nutriente envolvido (Martinez et al., 2008).

A mancha de olho pardo, por exemplo, é uma doença fúngica muito comum nos viveiros de produção de mudas de *C. canephora* e em áreas de

cultivo de café arábica. É favorecida pela deficiência/desequilíbrio nutricional (N, K, Ca, B e Zn). A intensidade da doença aumenta em plantas cultivadas em solos com baixo teor de matéria orgânica e em lavouras implantadas em faces de terrenos expostas ao sol da tarde.

Por outro lado, alguns nutrientes, particularmente aqueles requeridos em pequenas concentrações, quando aplicados em doses excessivas podem acumular-se nos tecidos da planta e desencadear sintomas de fitotoxidez.

2.4. Falta de adaptabilidade dos materiais genéticos.

Nos últimos anos notamos uma introdução em larga escala de clones de robustas amazônicos no Espírito Santo. Muitos foram plantados em grandes áreas e não se adaptaram às condições ambientais do Estado, apresentando crescimento limitado de ramos plagiotrópicos ou ortotrópicos, problemas de polinização e baixa carga de frutos. A introdução desses materiais não seguiu recomendação de pesquisas oficiais de melhoramento genético, que fundamentem a adaptabilidade e estabilidade produtiva de genótipos cultivados e avaliados, por várias safras, em locais sujeitos a diferentes condições ambientais.

Outro ponto que merece destaque é a migração das áreas de cultivo de conilon para regiões de maiores altitudes. Nota-se que alguns clones apresentam limitações no crescimento (plantas raquíticas e pouco enfolhadas), falhas no pegamento de floradas culminando em baixa produção de frutos por planta e seca de ramos ortotrópicos. Além disso, doenças pouco comuns como antracnose em folhas, infecções bacterianas, mancha de phoma, mancha de corynespora e cancro dos ramos atingem níveis epidêmicos, exigindo intervenções específicas de manejo.

Plantas de café cultivadas em condições adversas ficam sujeitas a diferentes fatores que induzem estresses fisiológicos e dificultam a produção

de metabolitos secundários ou formação de barreiras físicas que irão protegê-las contra agentes infecciosos.

2.5. Condições meteorológicas adversas

Problemas de escassez hídrica:

Cafeeiros sujeitos a longos períodos de estiagem podem sofrer clorose e murcha permanente das folhas. Esse quadro sintomatológico é agravado pela inter-relação do estresse hídrico com altas temperaturas, ventos e intensa radiação solar. Nesse caso, os frutos e folhas afetados cairão prematuramente. Outros sintomas associados ao déficit hídrico são: crescimento reduzido; abortamento e queda prematura de flores e chumbinho; agravamento do efeito de acidez do solo; sintomas de deficiência nutricional, principalmente daqueles nutrientes móveis e exigidos em grandes quantidades pelas plantas; e aumento da predisposição das plantas a doenças infecciosas.

Outro fato que dificulta a planta a suportar curtos períodos de estresse hídrico é a má formação e falta de aprofundamento do sistema radicular no solo. Neste caso, é importante reforçar a utilização de mudas bem formadas e o preparo adequado do solo no plantio.

Efeitos do excesso de luminosidade

No metabolismo celular, muitas das reações que levam a produção e utilização de energia pelas plantas, transferem elétrons para o oxigênio molecular, gerando espécies reativas de oxigênio, potencialmente capazes de causar peroxidação de lipídios e desnaturação de proteínas. Como consequência, esses danos oxidativos se traduzem nas folhas pelo aparecimento de áreas cloróticas, provocada pela degradação da clorofila, as quais podem evoluir para necroses nos tecidos foliares. Esse sintoma é conhecido como escaldadura das folhas.

Os sintomas se agravam ainda mais em cafezais mal adubados, carga pesada de frutos, déficit hídrico e cultivos em extremos de temperaturas.

Lavouras implantadas em regiões mais quentes, em altitudes mais baixas, e com a face voltada para o sol da tarde são as mais afetadas pela escaldadura.

Frutos a partir do início de maturação, quando expostos subitamente ou continuamente a intensa luz solar, também podem sofrer escaldaduras. Inicialmente há descoloração do tecido, com formação de manchas esbranquiçadas ou amareladas na superfície exposta à luz, causando isoporização do tecido afetado, chochamento, queima da casca e queda de frutos. Quando o fruto atinge a maturação, é comum a presença de fungos parasitas secundários e saprófitas. Os sintomas são comuns em clones de cafeeiros conilon que tombam ramos ortotrópicos com mais facilidade.

Algumas tecnologias vêm sendo geradas para minimizar esses problemas, tais como aplicação de protetores solares na folhagem do café e o sombreamento da cultura. A seleção de variedades e/ou clones com maiores atividades anti-oxidantes em seus tecidos e com maiores tolerâncias protoplasmática à dessecação podem constituir uma estratégia interessante para o melhoramento genético das plantas visando a seleção de plantas resistentes aos estresses oxidativos.

Efeito das altas temperaturas

Altas temperatura podem provocar sintomas de queimaduras e bronzeamento dos tecidos das plantas. Quando as plantas são expostas a altas temperaturas geralmente a folhagem desseca; o tecido foliar morre, começando pela ponta da folha, expandindo-se daí para as margens até culminar com a necrose do limbo foliar e queda prematura. Os efeitos danosos das altas temperaturas são, normalmente, acompanhados da influência de outros fatores ambientais, como excesso de insolação.

As altas temperaturas causam sintomas típicos de escaldadura. Outros sintomas como abortamento, queda de flores e frutos novos também podem ocorrer.

Em caule de plantas jovens, sem sombreamento das folhas na superfície do solo, pode ocorrer o anelamento da base do tronco acompanhado de necrose. A planta jovem murcha, desfolha e morre. Microrganismos secundários são comumente isolados de tecidos necrosados na região do coleto.

Efeito das baixas temperaturas.

Baixas temperaturas podem afetar a planta de duas maneiras: (i) temperatura próximo do mínimo necessário para crescimento do cafeeiro limitará a taxa de reações metabólicas, afetando o crescimento normal das brotações. Se as baixas temperaturas permanecerem por tempo prolongado poderá causar queima de folhas, brotos e botões florais, bem como a queda flores e frutos (chumbinho). (ii) temperaturas abaixo de 0°C leva à formação de cristais de gelo no citoplasma e no vacúolo das células. Os cristais danificam ou rompem a membrana plasmática, causando extravasamento do conteúdo citoplasmático, injúria e morte das células foliares. Isso fará com que elas escureçam rapidamente apresentado-se com aspecto queimado. Este fenômeno é conhecido como geada negra, sendo comum em regiões de invernos rigorosos ou em plantio de café em altas altitudes.

Granizo.

O granizo pode causar injúrias em graus variados no cafeeiro, a depender do estágio de desenvolvimento das plantas, da dimensão das pedras de gelo, da duração da chuva e das condições climáticas após o granizo. Os sintomas podem variar desde pequenas desfolhas até completa destruição da parte aérea das plantas, além de provocar queda de frutos. As pedras de gelo também podem causar ruptura na casca de ramos ortotrópicos e de brotos, abrindo portas de entrada para microrganismos patogênicos. Os ferimentos causados pelo granizo também favorecem a penetração de bactérias como *Pseudomonas syringae* pv. *garcae* causadoras da mancha areolada do cafeeiro.

Ventos fortes e frios.

Normalmente associado às tempestades, os ventos fortes podem causar injúrias nas plantas e seca de ramos. As folhas podem ser rasgadas, predispondo as plantas à invasão por patógenos fúngicos e bacterianos. Ventos fortes prolongados, precedidos de baixa umidade do solo e do ar e sob condições de altas temperaturas também podem causar queda de flores, inibição da polinização e fecundação, além de queda de folhas e secamento de ramos.

O vento é um fator de predisposição do cafeeiro à incidência da mancha de phoma. Em regiões sujeitas a estas condições, o plantio de culturas que funcionem como quebra-vento, é uma medida que pode mitigar os problemas com essa doença.

2.6. Solos compactados.

Solos com elevados teores de argila estão mais predispostos à compactação ou adensamento. Em geral, a presença de impedimentos físicos dificulta o crescimento de raiz principal e raízes laterais, reduzindo o volume de solo explorado pelo sistema radicular. Como consequência, as plantas ficam mais expostas aos efeitos do estresse hídrico. Na parte aérea, observa-se sintomas de murcha, amarelecimento, seca de ramos, queda de folhas/flores/frutos e queda na produção.

Outra consequência da compactação é o encharcamento do solo após prolongados períodos úmidos (chuvas intensas e prolongadas ou irrigação excessiva), criando-se ambiente favorável a patógenos causadores de tombamento e/ou podridões de raízes. A morte do sistema radicular e das hastes produtivas também podem ser observados em condições mais extremas.

2.7. Fitotoxidez causada por produtos fitossanitários.

Os sintomas de toxicidade por agrotóxicos no cafeeiro variam amplamente. A severidade das injúrias depende da natureza do produto fitossanitário, da sua formulação e dosagem, dos fatores ambientais no momento da aplicação (principalmente umidade e temperatura), bem como do estágio de desenvolvimento do clone/variedade cultivada.

Em geral, observa-se: crescimento reduzido da planta; lesões nas raízes; clorose marginal foliar, queima marginal foliar, queima do tecido internerval; formação anormal (deformação) de folhas e flores; manchas em folhas e flores, bronzeamento em folha; entumescimento de órgãos (hipocótilo, epicótilo, folha, ramos, frutos, brotações); queda de folhas e morte progressiva da planta de acordo com a dosagem do produto.

A fitotoxidez por herbicidas é comum em lavouras. O glifosato é um dos herbicidas mais utilizados no manejo de plantas daninhas. A deriva decorrente da aplicação próximo ao caule de plantas jovens, pode resultar em clorose foliar evoluindo para necroses, enrolamento de folhas e superbrotção. É oportuno considerar ainda que alguns herbicidas pré-emergentes também podem induzir sintomas de fitotoxidez em mudas recém-plantadas. Algumas lavouras têm apresentado sintomas severos de amarelecimento de folhas e “travamento” no crescimento das mudas após o plantio. Escolha errada de ponta de pulverização, tamanho de gota, pressão de pulverização e o uso do “chapéu napoleão” são medidas que precisam ser observadas e acompanhadas em campo.

A fitotoxidez causada por fungicidas, principalmente do grupo químico dos triazóis, também é comum em mudas no viveiro ou em plantas jovens/adultas no campo. Além disso a mistura de diferentes princípios ativos de inseticidas, fungicidas e/ou fertilizantes foliares, sem a devida orientação técnica, tem sido causa frequente de sintomas fitotoxidez em lavouras de café.

3. A diagnose doenças abióticas no cafeeiro.

O procedimento de diagnose exige que profissional esteja atento aos diversos fatores que alteram a fisiologia das plantas. Em muitas situações torna-se necessário o auxílio de especialistas de outras áreas do conhecimento (nutrição e fisiologia de plantas, fitotecnia, solos, fitossanidade etc.). Para realizar a diagnose correta desse tipo de problema no cafeeiro é importante:

1- Visitar a lavoura com problemas e conversar com os produtores para avaliar as condições do cultivo antes e após o aparecimento dos sintomas.

2- Observar a velocidade com que os sintomas apareceram na lavoura e correlacioná-los com execução de práticas culturais realizadas ou condições ambientais adversas. Em geral, plantas submetidas a problemas abióticos, os sintomas aparecem repentinamente e não apresentam evolução gradual do quadro sintomatológico com o passar do tempo.

3- Observar os detalhes do quadro sintomatológico em plantas individuais. Procure simetria dos sintomas nos órgãos afetados ou nitidez de bordos nas lesões (características típicas de doenças abióticas). Verifique o padrão de distribuição desses sintomas na planta, bem como a idade dos órgãos nos quais os sintomas predominam (folhas/ramos novos ou velhos). Analise se esses sintomas aparecem só de um lado da planta, ou estão distribuídos nas plantas ao longo de uma fileira; nas bordas dos talhões, nos locais onde foram aplicados determinados tratos culturais, etc.

4- Caso o café esteja em consórcio com outros cultivos (mamão, banana, por exemplo), observar se as plantas individuais dessas culturas também manifestam padrão sintomatológico parecido. Em alguns casos, vale a pena a observação de espécies de plantas daninhas na área.

5- Por fim, doenças de causa abiótica não induzem a formação de estruturas reprodutivas de patógenos, mesmo quando mantidas sob condições de câmara úmida. Além disso, não possibilita o isolamento de microrganismos em meios de cultura em condições laboratoriais.

Considerações finais

A adoção de tratos culturais intensivos visando obter altas produtividades das lavousas, sem uma adequada orientação técnica, deixa as plantas expostas ao risco de estresse fisiológico durante a maior parte do ciclo produtivo. Ao contrário do que se espera, isso pode induzir aparecimento de quadros sintomatológicos, redução de produtividade, além do aumento dos custos de produção. Plantas sob estresse têm processos fisiológicos básicos alterados, sistema de defesa fragilizado e ficam mais predispostas à ocorrência de doenças. A identificação desse tipo de problema exige uma análise criteriosa de fatores de solo, nutricionais, climáticos e das práticas culturais adotadas nas lavouras.

Referências

- Agrios, G. N. **Plant Pathology**. 5a ed. San Diego: Academic Press Publisher, 2005.
- Martinez, H.E.P.; Neves, Y.P.; Zabini, A.V.; Clemente, J.M.; Pedrosa, A.W. Diagnose foliar em cafeeiro. In.: Tomaz, M.A.; Amaral, J.F.T.; Jesus Junior, W.C.; Pezzopane, J.R.M. **Seminário para a sustentabilidade da cafeicultura**. 1ª ed. Alegre, ES: Ufes, Centro de Ciências Agrárias, 2008. pp. 137-168.
- Resende, J.A.M. Doenças Abióticas e Injúrias. In.: Amorim, L.; Resende, J.A.M.; Bergamin Filho, A. (Eds.). **Manual de fitopatologia: princípios e conceitos**. 5.ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 2011. pp. 509-515.
- Ronchi, C.P; DaMatta, F.M. Aspectos fisiológicos do café conilon. In Ferrão, R.G.; Fonseca, A.F.A.; Bragança, S.M.; Ferrão, M. A.; De Muner, L.H. (Eds) **Café Conilon**. Vitória, ES: Incaper 2007. pp.93-119.
- Zambolim, L.; Sobreira, D.G.; Souza, A.F.; Costa, H. Manejo Integrado das doenças do conilon (*Coffea canephora*). In: Zambolim, L. (ed). **Tecnologias para Produção do Café Conilon**. Viçosa: UFV, 2009. pp.01-45.
- Zambolim, L. Souza, A.F; Zambolim, E.M.; Rena, A. B. Seca de ramos do cafeeiro – fatores bióticos e abióticos. In: Zambolim, L. **Boas Práticas Agrícolas na Produção de Café**. Viçosa: UFV, DFP, 2006. pp.1-60.

CAPÍTULO 05

Impacto de mudanças climáticas em pragas com ênfase no café

Adriene Caldeira Batista

Edmond Joseph Djibril Barry

Marinaldo Loures Ferreira

Vanessa Gonçalves do Nascimento

Ricardo Siqueira da Silva

Renan Batista Queiroz

1. Introdução

A cafeicultura é um dos setores mais importantes da agricultura, assegurando os meios de vida de milhões de produtores pelo mundo. Além da influência econômica, a cafeicultura é fundamental para segurança alimentar, geração de empregos e desenvolvimento rural nos principais países produtores como o Brasil, Vietnã, Colômbia e Etiópia (Bracken et al., 2023). No entanto, a produção do grão nessas regiões é vulnerável às mudanças climáticas, podendo impactar a produtividade e qualidade das colheitas.

As mudanças climáticas causam alterações significativas nos sistemas agrícolas globais, afetando padrões de temperatura, precipitação e a frequência de eventos climáticos extremos (IPCC, 2023). Esses fatores influenciam diretamente o desenvolvimento das culturas e a dinâmica de organismos associados, em especial pragas agrícolas, alterando ciclos

reprodutivos, sobrevivência e distribuição geográfica (Skendžić et al., 2021; Wilson et al., 2021; Burc et al., 2025). As perdas econômicas associadas às pragas podem, em algumas situações, superar os efeitos diretos das mudanças do clima sobre a fenologia do café (Jaramillo et al., 2011; Magrach; Ghazoul, 2015; Groenen, 2018). O café é afetado diretamente pelas mudanças climáticas, principalmente pelo aumento de CO₂ atmosférico, que pode alterar crescimento, produtividade e a interação com pragas. Estudos em condições de enriquecimento de CO₂ mostraram que o café pode ter ganhos moderados de produtividade, mas esses ganhos vêm acompanhados de alterações na dinâmica das pragas (Subedi, et al. 2023)

2. Fundamentos biológicos dos Impactos Climáticos

Na cafeicultura, a maior parte da produção ocorre em sistemas de sequeiro, o que torna o cultivo altamente dependente dos padrões de chuva. Nesse contexto, a intensidade e a sazonalidade da precipitação influenciam diretamente o desenvolvimento das plantas, sendo que períodos de seca podem limitar a floração, embora favoreçam a secagem e a colheita dos frutos (Gidey et al., 2020). A distinção entre as estações seca e chuvosa é indispensável para o café arábica (*Coffea arabica* L.), mais sensível à escassez hídrica do que o conilon/robusta (*Coffea canephora*). Além dos efeitos diretos sobre o desenvolvimento e a viabilidade das lavouras, as mudanças climáticas já intensificam surtos de pragas e doenças e extremos climáticos.

De modo geral, as projeções indicam que o aumento das temperaturas e a instabilidade das chuvas contribuem para a redução das áreas adequadas à produção de café em todo o mundo, impactando tanto o *C. arabica* quanto o robusta *C. canephora* (Bunn et al., 2015; Läderach, 2017; Gomes et al., 2020; Zhu et al., 2024; Tavares et al., 2018; Ferreira et al., 2024).

3. Principais pragas do cafeeiro afetadas pelas mudanças climáticas

Estudos indicam que o cultivo de café enfrentará declínios na produtividade, alterações nas áreas de aptidão e aumento na incidência de pragas e doenças (Constantino et al., 2021; Bilen et al., 2023; Ferreira et al., 2024). Estes demonstraram esperar um crescimento na distribuição e taxas reprodutivas de pragas, como a broca do café (*Hypothenemus hampei* Ferrari, 1867 (Coleoptera: Scolytidae)) (Jaramillo et. al., 2011). A maior frequência reprodutiva ao longo do mês aumenta a infestação do nematoide do café (*Meloidogyne incognita*) e do bicho mineiro (*Leucoptera coffeella* Guérin-Mèneville & Perrottet, 1842 (Lepidoptera: Lyonetiidae)) no Brasil (Ghini et. al., 2011). A seguir, destacam-se algumas das principais pragas:

3.1 Broca do café (*Hypothenemus hampei*)

A broca-do-café é considerada o principal inseto-praga da cultura cafeeira mundial, pois compromete tanto o rendimento quanto a qualidade do café (Infante, 2018; Johnson et al., 2020). Tem ampla distribuição pelo mundo e está presente na África subsaariana ocidental e central, na Ásia, na América (Vega et al., 2019). Projeções indicam que as perdas de safra tendem a se intensificar e a expandir-se geograficamente devido ao aumento das temperaturas médias e à maior variabilidade no regime de precipitação, condições que favorecem a proliferação da praga (Moreno-Ramirez et al., 2024).

Hypothenemus hampei tem ciclo curto, uma alta capacidade reprodutiva, passa pelas fases de ovo, larva, pupa e adulto (Ferreira et al., 2024). Condições de altas temperaturas combinadas com baixa umidade relativa favorecem a reprodução, dispersão e intensidade de infestação da praga (Constantino et al., 2021; Gil-Palacio et al., 2021). Adicionalmente, fatores microclimáticos associados à altitude influenciam diretamente o ciclo

de *H. hampei* e o desenvolvimento do cafeeiro, modulando a intensidade dos surtos (Whittaker et al., 2024). Na Colômbia, *H. hampei* apresenta maior incidência em localidades abaixo de 1.300m de altitude, onde as temperaturas médias permanecem acima de 21°C ao longo do ano (Constantino et al., 2021).

No Brasil, *H. hampei* apresenta maior densidade populacional nos meses de menor pluviosidade, o que indica que a espécie tolera altas temperaturas e se beneficia de períodos prolongados de déficit hídrico (Botelho et al., 2021). De acordo com as projeções futuras do modelo CLIMEX sob o cenário HadCM3 (A2 e B2), foi previsto adequação de *H. hampei* em todos os continentes, particularmente em áreas de clima tropical (Jaramillo et al., 2011). Atualmente, a nível nacional temos alta adequação climática nas regiões Sul e Sudeste, também responsáveis por 86% da produção do café brasileiro (Ferreira, 2024). O contexto brasileiro não é diferente do global pois houve uma alta redução da adequação climática no Sul e Sudeste. E o sul ainda conserva uma certa adequação climática apesar de ser mínima (Jaramillo et al., 2011).

3.2 Bicho mineiro (*Leucoptera coffeella*)

O bicho-mineiro é uma das pragas mais relevantes da cafeicultura em função dos severos danos que provoca às lavouras, podendo reduzir a produtividade entre 30% e 70%, dependendo do nível de infestação (Rocha et al., 2022; Dami et al., 2023). O inseto é considerado holometábolo, ou seja, seu ciclo de vida passa por estágios de ovo, larva, pupa e adulto (Motta et al., 2021) e no Brasil, constataram que a praga ocorre durante todo o ciclo do cafeeiro, com picos populacionais nas fases vegetativas e de floração (Walerius et. al., 2023). Esses surtos coincidem com períodos de temperaturas elevadas e baixa precipitação, condições que favorecem sua multiplicação (Dantas et al., 2021).

Evidências recentes indicam que o aquecimento global poderá modificar a distribuição geográfica e intensificar a dinâmica populacional da praga, com tendência de expansão para regiões antes menos suscetíveis, como áreas de maior altitude (Altamiranda-Saavedra et al., 2024; Alfizar; Nasution, 2024). Estudos genéticos demonstram que as populações da praga em diferentes países apresentam sinais de crescimento recente e disseminação geográfica, sugerindo aumento rápido das populações e expansão para novas áreas (Pantoja-Gomez et al., 2021; Subedi et al., 2023).

De acordo com Altamiranda-Saavedra et al. (2024), a adequação climática do bicho mineiro é ampla, ocorrendo em todos os continentes, com distribuição nativa na África e invasiva na América (área invadida). Embora esteja presente, em sua maioria, em clima semelhante aos de sua área nativa, a espécie já coloniza ambientes distintos, o que, aliados às mudanças climáticas, pode intensificar sua alteração. Alterações nos nichos podem forçar insetos da ordem Lepidoptera, como o bicho mineiro, a se adaptar a novos ambientes (Li Bing et al., 2023; Bovey et al., 2024).

3.3 Ácaros

O ácaro vermelho do café *Oligonychus ilicis* McGregor, 1917 (Acari: Tetranychidae), é considerado praga importante para o café conilon, que se mostra mais sensível ao ácaro do que o café arábica (Toledo et al., 2018). Em períodos de longa estiagem e sem o manejo adequado, o ácaro vermelho do café pode se espalhar por toda a lavoura, causando desfolha e comprometendo o desenvolvimento de plantas jovens (Reis, 2005). Em épocas de chuvas intensas, o efeito mecânico da água reduz as populações do ácaro vermelho do café, que vivem na superfície das folhas e tecem teias com fios dispersos (Franco et al., 2008). O ácaro vermelho do café se desenvolve em uma faixa térmica de 24 a 29 °C (Rodrigues et al., 2011), próxima à temperatura ideal

para o cultivo de *C. canephora*, que está entre 20 e 30°C (Navarro et al., 2018).

Brevipalpus phoenicis Geijskes, 1939 (Acari: Tenuipalpidae), conhecido como ácaro da leprose, é uma praga importante em regiões tropicais e subtropicais. Sua importância se deve ao potencial vetor da mancha-anular do cafeeiro (*Coffee ring spot virus* – CoRSV) doença de grande impacto econômico tanto em arábica quanto conilon (Mendonça et al., 2011). O ciclo do ácaro da leprose passa por quatro fases: ovo, larva, pupa e adulto. A reprodução e o desenvolvimento do ácaro variam conforme à sua fonte alimentar (Teodoro Reis, 2006).

A infestação avança dentro da mesma fileira, principalmente por operações de poda e colheita realizadas em plantas já atacadas. O vento também ajuda na movimentação, levando o ácaro de uma planta para outra (Maldonado Jr et al., 2016). Entre as principais plantas hospedeiras do ácaro da leprose estão citros, café, mamão, maçã, pêra, goiaba e videira, além de diversas ornamentais e plantas daninhas (Mendonça et al., 2011). O desenvolvimento da espécie também é influenciado pela temperatura.

Assim como para *O. ilicis*, condições como temperaturas elevadas e baixa umidade tornam o ambiente mais favorável para o aumento populacional de *B. phoenicis*. Por outro lado, períodos com chuvas frequentes e consecutivas tendem a reduzir a infestação, uma vez que a água pode provocar a remoção mecânica dos ácaros das folhas, além de elevar temporariamente a umidade relativa, criando condições menos adequadas para sua sobrevivência e reprodução (Laranjeira et al., 2015).

Considerando o aumento de até 3 °C na média das temperaturas nos próximos 30 anos, áreas hoje adequadas para os ácaros podem se tornar inadequadas ao seu desenvolvimento. Nesse cenário, populações de insetos adaptadas ao calor podem influenciar nas perdas agrícolas futuras (Burc et al., 2025). Além disso, as mudanças no clima podem alterar o comportamento das

plantas hospedeiras. Com isso, os períodos de maior suscetibilidade das plantas podem coincidir, em maior ou menor grau, com o pico populacional (Paudel et al., 2020). Por outro lado, se a temperatura permanecer dentro da faixa ótima, poderão se reproduzir mais rapidamente, aumentando o número de gerações no período e intensificando os problemas (Fazuoli et al., 2007; Rodrigues et al., 2011).

3.4 Cochonilhas

As cochonilhas constituem um dos principais grupos de insetos-pragas do café, e entre elas, a cochonilha-farinhenta, *Planococcus citri* Risso, 1813 (Hemiptera: Pseudococcidae), se destaca pela ampla distribuição e impactos na produção (Claps, Terán, 2001; Santa-Cecília, Souza, 2005). A cochonilha verde, *Coccus viridis* Green, 1889 (Hemiptera: Coccidae), ataca plantas jovens e adultas de café arábica e conilon em dossel de plantios adensados (Hollingworth, 2000; Costa et al., 2009). A cochonilha verde ocorre com maior frequência durante o período chuvoso, entre novembro e fevereiro (Costa et al., 2009).

As cochonilhas são insetos polípagos, sendo citado como pragas de várias árvores frutíferas, arbustos, culturas hortícolas e ornamentais (Bodenheimer, 1951; Ben-Dov, 2007). O aumento da densidade de plantas por hectare e adubações excessivas em busca de maior produtividade, tem elevado a importância dessas cochonilhas (Rosado et al., 2006). Causam danos à planta ao se alimentar da seiva e excretar um líquido açucarado que favorece o desenvolvimento de fumagina (Costa et al., 2009). Além disso, no cafeeiro a cochonilha farinhenta ocupa a região do pedúnculo, suga a seiva, causando chochamento, queda de botões florais e frutos (Cecília et al., 2007).

A sobrevivência de *P. citri* e *C. viridis* dependem fortemente da temperatura. Em temperaturas amenas e alta umidade, os ciclos reprodutivos podem reduzir de 60 para cerca de 30 dias, favorecendo explosões

populacionais em plantios sombreados ou regiões de clima tropical úmido (Fernandes et al., 2009; Santa-Cecília et al., 2020). De acordo com o trabalho de Cui et al., (2024), a cochonilha do algodão, *Phenacoccus solenopsis* Tinsley 1898, (Hemiptera: Pseudococcidae), tolera altas temperaturas e deve expandir consideravelmente seu habitat no futuro em função das mudanças climáticas. Outra cochonilha-farinhenta, *Pseudococcus viburni* (Signoret, 1875) (Hemiptera: Pseudococcidae), também apresentará aumento na área total de habitats adequados sob condições climáticas futuras (Wei et al., 2024). Evidenciando os riscos representados pelas cochonilhas. Mais recentemente no norte do ES e sul da BA, houve o aparecimento e elevado nível populacional de duas espécies novas de cochonilhas em cafezais de conilon/robusta, *Pseudococcus jackbeardsleyi* e *Ferrisia dasyliirii* (Rondelli et al., 2018). Ambas tiveram esse aumento devido ondas de calor que ocorreram nessas regiões nos meses de outubro e novembro de 2022.

3.5 Nematoides do cafeeiro

Várias espécies de nematoides estão associadas à cafeicultura, porém as espécies dos gêneros *Meloidogyne* e *Pratylenchus* são as mais comumente encontradas em plantas de café. São endoparasitas que invadem as raízes do cafeeiro, induzindo a formação de galhas onde as fêmeas se alimentam e se reproduzem (Le et al., 2019). Em mudas jovens, os nematoides são mais agressivos, enquanto em plantas adultas causam deficiências de nutrientes, desfolha e atrofiamento (Saikai et al., 2023). Esses danos dificultam o diagnóstico, pois os sintomas se confundem com problemas de fertilidade do solo, deficiência nutricional ou estresse hídrico (Villain et al., 2018).

No Brasil, *Meloidogyne exigua*, *M. incognita* e *M. paranaensis* predominam entre os nematóides, enquanto espécies do gênero *Pratylenchus* ocorrem com menor frequência (Oliveira e Rosa, 2018). Os sintomas mais comuns de plantas atacadas por nematóides do gênero *Meloidogyne* são

galhas nas raízes, desfolha e morte de plantas. Para o gênero *Pratylenchus* ocorre redução do tamanho das raízes e da parte aérea das plantas. Temperaturas elevadas podem induzir a migração dos nematóides para camadas mais profundas do solo, alterando sua dinâmica populacional (Ghini et al., 2008). Ghini et al., (2008), aponta em seus resultados que em cenários de temperaturas mais altas e diminuição de chuvas, pode haver redução dos danos causados por *M. incognita* no Brasil.

4. Considerações finais

A mudança climática é considerada um desafio para a sustentabilidade da cafeicultura mundial, influenciando diretamente a produtividade, a qualidade dos grãos e a dinâmica das principais pragas associadas ao cultivo. A elevação das temperaturas e a irregularidade das chuvas alteram a distribuição geográfica e os ciclos reprodutivos de organismos como a broca-do-café, bicho-mineiro, ácaros, cochonilhas e nematóides ampliando os riscos fitossanitários e demandando maior atenção ao manejo integrado. Além disso, os impactos regionais observados no Brasil e em outros países produtores evidenciam vulnerabilidades socioeconômicas que afetam milhões de famílias agricultoras. O aumento de temperatura e CO₂ pode reduzir mecanismos de defesa da planta (como a produção de jasmonato), deixando-a mais vulnerável ao ataque de insetos. Em resumo, apesar do potencial de maior crescimento vegetativo e produtividade do café em cenários de maior CO₂, as mudanças climáticas favorecem pragas-chave da cultura, como a broca-do-café e o bicho-mineiro, podendo gerar sérias perdas de produção se não houver manejo adequado.

Diante desse cenário, a adoção de estratégias de adaptação torna-se essencial para garantir a resiliência da cafeicultura. O fortalecimento das práticas mais sustentáveis, como por exemplo, o uso de sistemas sombreados, bem como a formulação de políticas públicas específicas, são caminhos

promissores para mitigar os efeitos das mudanças ambientais. Assim, compreender a interação entre clima, pragas e produção é fundamental para orientar medidas de manejo e assegurar a continuidade dessa cadeia produtiva de grande importância econômica e social.

5. Referências

- Altamiranda-Saavedra, M. et al. Identifying Areas of Invasion Risk and Changes in the Ecological Niche Occupied by the Coffee Leaf Miner *Leucoptera coffeella* (Lepidoptera: Lyonetiidae). **Neotropical Entomology**, v. 53, n. 3, p. 608-616, 2024.
- Bilen, C.; El Chami, D.; Mereu, V.; Trabucco, A.; Marras, S.; Spano, D. A Systematic Review on the Impacts of Climate Change on Coffee Agrosystems. **Plants**, v.12, p.102, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12010102>.
- Bovay, B. et al. Adapting to change: Exploring the consequences of climate-induced host plant shifts in two specialist Lepidoptera species. **Ecology and Evolution**, v. 14, n. 6, p. E11596, 2024.
- Bracken, P.; Burgess, P.J.; Girkin, N.T. Opportunities for enhancing the climate resilience of coffee production through improved crop, soil and water management. **Agroecology and Sustainable Food Systems**, v. 47, n. 8, p. 1125-1157, 2023.
- Bunn, C. et al. A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. **Climatic change**, v. 129, n. 1, p. 89-101, 2015.
- Burc, E.; Girard-Tercieux, C.; Metz, M.; Cazaux, E.; Baur, J.; Koppik, M.; Rêgo, A.; Hart, A.F.; Berger, D. Life-history adaptation under climate warming magnifies the agricultural footprint of a cosmopolitan insect pest. **Nature Communications**, v.16, n.1, p.827, 2025. <https://doi.org/10.1038/S41467-025-56177-2>.
- Claps, L.E.; Terán, A.L. Diaspididae (Hemiptera: Coccoidea) asociadas a cítricos en la Provincia de Tucumán (Republica da Argentina). **Neotropical Entomology**, v.30, n.3, p.391-402, 2001.
- Constantino, L.M.; Gil, Z.; Montoya, E. Et al. Coffee Berry Borer (*Hypothenemus hampei*) Emergence from Ground Fruits Across Varying Altitudes and Climate Cycles, and the Effect on Coffee Tree Infestation. **Neotrop Entomol**, v.50, p.374–387, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13744-021-00863-5>.
- Costa, J.N.M. et al. Cochonilhas ocorrentes em cafezais de Rondônia. **Circular Técnica**. Embrapa. 2009.
- Cui, C. et al. A survey on multimodal large language models for autonomous driving. In: **Proceedings of the IEEE/CVF winter conference on applications of computer vision**. 2024. P. 958-979.
- Fazuoli, L. C. et al. Cultivares de café arábica do IAC, um patrimônio da cafeicultura brasileira. In: **Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras**, 33., 2007, Lavras. Anais. Brasília,vDF: Embrapa Café, 2007. 10 p.

- Ferreira, M. L. et al. Effects of the climate change scenario on *Coffea canephora* production in Brazil using modeling tools. **Tropical Ecology**, v. 65, n. 4, p. 559-571, 2024.
- Franco, R. et al. Dinâmica populacional de *Oligonychus ilicis* (Mcgregor, 1917) (Acari: Tetranychidae) em cafeeiro e de fitoseídeos associados a ele. **Circular Técnica**. Embrapa. 2008.
- Ghini, R. et al. Incubation period of *Hemileia vastatrix* in coffee plants in Brazil simulated under climate change. **Summa Phytopathologica**, v. 37, p. 85-93, 2011.
- Ghini, R.; Hamada, E.; Pedro Júnior, M.J.; Marengo, J.A.; Gonçalves, R. R.V. Análise de risco da mudança climática sobre nematoides e o bicho-mineiro do cafeeiro no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 2, p. 187-194, fev. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000200004>.
- Gidey, T.; Oliveira, T.S.; Crous-Duran, J.; Palma, J.H. Using the yield-SAFE model to assess the impacts of climate change on yield of coffee (*Coffea arabica* L.) Under agroforestry and monoculture systems. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 1, p. 57-70, 2020.
- Gil, Z.N.; Constantino, L.M.; Benavides, P. Dispersión de la broca del café. **Avances Técnicos**, Cenicafe, 531, 1–12. <https://doi.org/10.38141/10779/0531>. 2021.
- Gomes, L.C. et al. Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production: a spatially explicit assessment in Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 294, p. 106858, 2020.
- Groenen, D. The effects of climate change on the pests and diseases of coffee crops in Mesoamerica. **Journal of Climatology & Weather Forecasting**, v.6, n.03, 2018. <http://dx.doi.org/10.4172/2332-2594.1000239>.
- Infante, F. Pest management strategies against the coffee berry borer (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 66, n. 21, p. 5275-5280, 2018.
- Jaramillo, J. et al. Some like it hot: the influence and implications of climate change on coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) and coffee production in East Africa. **Plos one**, v. 6, n. 9, p. E24528, 2011.
- Läderach, P. et al. Climate change adaptation of coffee production in space and time. **Climatic change**, v. 141, n. 1, p. 47-62, 2017.
- Laranjeira, F.F. et al. Infestation dynamics of *Brevipalpus phoenicis* (Geijskes) (Acari: Tenuipalpidae) in citrus orchards as affected by edaphic and climatic variables. **Experimental and Applied Acarology**, v. 66, n. 4, p. 491-508, 2015.
- Laurentino, E.; Costa, J.N.M. Descrição e caracterização biológica da broca-do-café (*Hypothenemus hampei*, Ferrari 1867) no Estado de Rondônia. **Documentos**. Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2004.
- Le, T.M.L. et al. A new root-knot nematode, *Meloidogyne moensi* n. sp. (Nematoda: Meloidogynidae), parasitizing Robusta coffee from Western Highlands, Vietnam. **Helminthologia**, v. 56, n. 3, p. 229, 2019.

- Li, B. et al. Forecasting habitat suitability and niche shifts of two global maize pests: *Ostrinia furnacalis* and *Ostrinia nubilalis* (Lepidoptera: Crambidae). **Pest Management Science**, v. 80, n. 10, p. 5286-5298, 2024.
- Magrath, A.; Ghazoul, J. Climate and pest-driven geographic shifts in global coffee production: Implications for forest cover, biodiversity and carbon storage. **Plos one**, v.10, n.7, p.e0133071, 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133071>.
- Mendonça, M.J.C. et al. Tabela de vida de fertilidade de *Brevipalpus phoenicis* (Geijskes, 1939) (Acari: Tenuipalpidae) em diferentes cultivares de café (*Coffea* spp.). **Arquivos do Instituto Biológico**, v. 78, n. 3, p. 377-383, 2011.
- Moreno-Ramirez, N. et al. Ecology and management of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*): the potential of biological control. **Biocontrol**, v. 69, n. 2, p. 199-214, 2024.
- Motta, I.O; Dantas, J.; Vidal, L.; Bílio, J.; Pujol-Luz, Jr.; Albuquerque, É.V.S. O Minador de Folhas de Café, *Leucoptera coffeella* (Lepidoptera: Lyonetiidae): Identificação dos Instares Larvais e Descrição da Genitália Masculina e Feminina. **Rev. Brás. Entomol.** 2021, 65, e20200122. doi: <https://doi.org/10.1590/1806-9665-RBENT-2020-0122>.
- Navarro, A. et al. Áreas potenciales y vulnerabilidad del cultivo de café tipo robusta (*Coffea canephora* P.) al cambio climático en el estado de Tabasco, México. **Nova Scientia**, León, v.10, n. 20, p. 369-396, 2018. Disponible en <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052018000100369&lng=es&nrm=iso>. accedido en 18 sept. 2025. <https://doi.org/10.21640/ns.v10i20.1379>.
- Oliveira, C.M.G; Rosa, J.M.O. Nematóides parasitos do cafeeiro. Instituto Biológico, **Boletim Técnico** n° 32, São Paulo, 2018.
- Paudel, S. et al. Asymmetric responses to climate change: temperature differentially alters herbivore salivary elicitor and host plant responses to herbivory. **Journal of Chemical Ecology**, v. 46, n. 9, p. 891-905, 2020.
- Reis, P.R.; Pedro Neto, M.; Franco, R.A. Control of *Brevipalpus phoenicis* (Geijskes, 1939) and *Oligonychus ilicis* (Mcgregor, 1917) (Acari: Tenuipalpidae, Tetranychidae) in coffee plants and the impact on beneficial mites: II-Spirodiclofen and Azocyclotin. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, p. 528-537, 2005.
- Rodrigues, G.J.; Chaves, E.S.; Oliveira, D.C.; Almeida, L.; Lima, N.B.; Santos, Jr; Martins, D.S. Desenvolvimento de *Oligonychus ilicis* em *Coffea canephora* sob diferentes temperaturas. **Bragantia**, v. 70, n. 3, pág. 606-610, 2011. DOI: 10.1590/S0006-87052011000300020.
- Rondelli, V.M.; Peronti, A.L.B.G.; Dias, J.R.M.; Fogaça, I.; Santos, I.L. V.; Nery, A.G. New records of mealybugs (Hemiptera: Pseudococcidae) infesting rosettes of Conilon coffee plants in the state of Rondônia, South-Western Amazon, Brazil. **Florida Entomologist**, v. 101, n. 4, p. 705-707, 2018.
- Saikai, K.K. et al. Biocontrol-based strategies for improving soil health and managing plant-parasitic nematodes in coffee production. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1196171, 2023.

- Santa-Cecília, L.V.C.; Souza, B. Controle biológico de cochonilhas-farinhas em cultivos protegidos. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.26, n.225, p.24-30, 2005.
- Skendžić, S.; Zovko, M.; Živković, I.P.; Lešić, V.; Lemić, D. The impact of climate change on agricultural insect pests. **Insects**, v.12, n.5, p.440, 2021. <https://doi.org/10.3390/insects12050440>.
- Subedi, B. et al. Impact of climate change on agriculture and food research. **Journal of Agriculture and Food Research**, 14: 100733 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100733>.
- Tavares, P.S. et al. Climate change impact on the potential yield of Arabica coffee in southeast Brazil. **Regional Environmental Change**, v. 18, n. 3, p. 873-883, 2018.
- Toledo, M.A. et al. Biological control of southern red mite, *Oligonychus ilicis* (Acari: Tetranychidae), in coffee plants. **Advances in Entomology**, v. 6, n. 02, p. 74, 2018.
- Vega, F.E. et al. Elucidation of hosts, native distribution, and habitat of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) using herbaria and other museum collections. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 1188, 2019.
- Villain, L.; Salgado, S.L.; Phap, Q.T. Nematode parasites of coffee and cocoa. In: **Plant parasitic nematodes in subtropical and tropical agriculture**. Wallingford UK: CAB International, 2018. P. 536-583.
- Walerius, A.H.; Pallini, A.; Venzon, M.; Santana Júnior, P.A.; Costa, T.L.; Paes, J.D.S.; Pimentel, E.D.S.; Picanço, M.C. Use of Geostatistics as a Tool to Study Spatial-Temporal Dynamics of *Leucoptera coffeella* in Coffee Crops. **Agriculture**, v.13, p.438, 2023. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020438>.
- Wei, J. et al. Global potential distribution of invasive species *Pseudococcus viburni* (Hemiptera: Pseudococcidae) under climate change. **Insects**, v. 15, n. 3, p. 195, 2024.
- Whittaker, L. et al. The effect of an altitudinal gradient on the abundance and phenology of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) (Ferreri) (Coleoptera: Scolytidae) in the Colombia Andes. **International Journal of Pest Management**, p. 1-12, 2024.
- Wilson, J.K.; Casajus, N.; Hutchinson, R.A.; McFarland, K.P.; Kerr, J.T.; Berteaux, D.; Larrivé, M.; Prudic, K.L. Climate Change and Local Host Availability Drive the Northern Range Boundary in the Rapid Expansion of a Specialist Insect Herbivore, *Papilio cresphontes*. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v.9, p.579230, 2021. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.579230>.
- Zhu, Y. et al. Assessing the climate change impacts on *Coffea arabica* cultivation regions in China. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 155, n. 8, p. 7773-7791, 2024.

CAPÍTULO 6

Conilon de qualidade em Sooretama: uma jornada de tradição e sucessão familiar

Lucas Broedel Cabral

1. Introdução: Raízes e formação de um Engenheiro Agrônomo cafeicultor

Meu nome é Lucas Broedel Cabral, e minha história com o café Conilon é profundamente entrelaçada com minhas raízes familiares e minha formação acadêmica. Sou engenheiro agrônomo, graduado pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) entre 2017 e 2022. Embora minha jornada tenha começado em Vila Velha, a busca por conhecimento me levou a São Mateus para a universidade. Foi durante a graduação, em 2020, que iniciei minha atuação no Sítio Recanto Sonhado, a propriedade de meus avós, Arlindo e Marilda, em Sooretama. Eles, produtores de Conilon há muito tempo, foram meus primeiros mestres, transmitindo-me a sabedoria acumulada de gerações. Essa imersão na tradição familiar, combinada com o rigor científico da minha formação, moldou minha abordagem à cafeicultura.

Minha paixão pelo café especial se aprofundou com a pós-graduação em Fisiologia Vegetal, Nutrição e Desenvolvimento de Plantas, iniciada em 2022, e a especialização em classificação e degustação de cafés em 2023. Essa busca contínua por conhecimento técnico e especializado me permitiu aplicar inovações no manejo do Conilon, visando aprimorar a qualidade da bebida. O

mercado de cafés especiais, em constante crescimento, oferece um cenário promissor para o Espírito Santo, e Sooretama, com seu potencial para o Conilon de alta qualidade, tornou-se o palco de muitas realizações. O reconhecimento de nosso trabalho veio com as vitórias em dois concursos consecutivos de cafés especiais na região (2023 e 2024), um testemunho da sinergia entre a tradição familiar e a inovação científica que buscamos no Sítio Recanto Sonhado.

2. Desafios e estratégias: aplicação do conhecimento na prática

A produção de café Conilon de alta qualidade é um desafio constante, que exige a aplicação de conhecimentos agrônômicos precisos. Minha formação na UFES me forneceu as ferramentas para otimizar o cultivo, desde a seleção de genótipos até a gestão hídrica e o manejo fitossanitário. No entanto, a experiência prática e a sabedoria transmitida por meu avô foram cruciais para adaptar essas teorias à realidade do Sítio Recanto Sonhado. A combinação do rigor científico com o conhecimento empírico tem sido a chave para superar os obstáculos impostos pelas variações climáticas e garantir a sustentabilidade da produção.

2.1. Seleção de Clones

A avaliação sensorial do café é uma disciplina complexa que envolve a percepção e interpretação de diversos atributos da bebida por provadores treinados. Essa metodologia é padronizada por organizações como a Specialty Coffee Association (SCA) e a Associação Brasileira de Cafés Especiais (BSCA), que estabelecem protocolos rigorosos para garantir a consistência e a comparabilidade dos resultados. Dito isso, determina-se que cada clone deve ser colido separadamente, efetuando uma colheita mais padronizada e fiel as características de cada genótipo da área. Prioriza-se clones a partir de segunda colheita, por apresentarem uma melhor entrega de características sensoriais.



Figuras 1 e 2. Clone Ouro negro e clone K61– Fonte: Lucas Broedel

2.2. Ponto de Colheita

Os grãos maduros visualmente podem nos enganar, para que haja uma colheita efetivamente de frutos maduros, usamos um equipamento chamado refratômetro brix. Usamos 5 grãos em média, espremendo o líquido proveniente do fruto do café na tela do equipamento e determinamos que a colheita pode ser realizada quando for medido acima de 25° brix.



Figuras 3 e 4. Refratômetro brix e medição de 26° brix: Lucas *Broedel*

2.3. Colheita

A colheita seletiva, embora demande maior investimento em mão de obra, é fundamental para a obtenção de cafés especiais. A capacitação da equipe e o planejamento antecipado são estratégias que adotamos para mitigar os desafios da escassez de mão de obra e garantir a integridade dos grãos.



Figura 5. Colheita seletiva – Fonte: Lucas Broedel

2.4. Pós-colheita

A pós-colheita é uma fase determinante para a qualidade final do café. A escolha do método de processamento e o controle rigoroso da fermentação e secagem são essenciais. Minha especialização em classificação e degustação de cafés me permitiu refinar esses processos, buscando a otimização dos atributos sensoriais do grão.



Figuras 6 e 7. Cafés em casca naturais – Fonte: Lucas Broedel



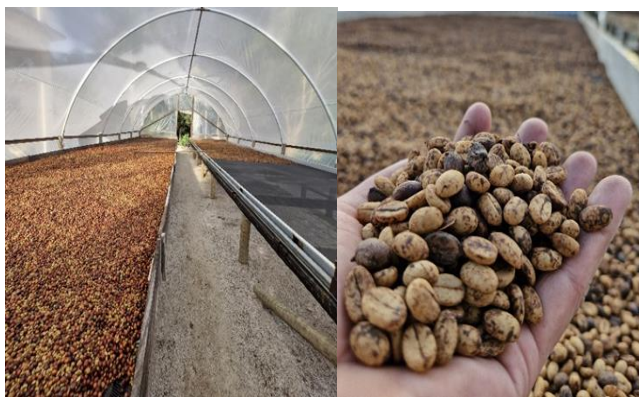
Figuras 8 e 9. Fermentação natural anaeróbica e fermentação induzida anaeróbica – Fonte: Lucas Broedel



Figuras 10 e 11. Fermentação anaeróbica em água e Café cereja descascado – Fonte: Lucas Broedel

2.5. Secagem

A secagem dos cafés especiais deve ser feita de forma lenta e homogênea, mantendo uma temperatura constante e abaixo de 35° celsius. Os grãos devem ser revirados de 8 a 12 vezes ao dia, concentrando – se a maior parte nas horas mais quentes do dia.



Figuras 12 e 13. Estufa de terreiro suspenso e Grãos despulpados secos –
Fonte: Lucas Broedel

2.6. Descascar o grão ou Pilar o café

Esse processo deve ser realizado com os grãos secos, a umidade deve estar entre 11,5° a 12,0°. Escolha as vazadeiras conforme o fruto, evitando assim quebras e futuros defeitos.



Figuras 14 e 15. Máquina de pilar café e café descascado: Lucas Broedel

2.7. Cupping ou avaliação sensorial de café

É um método padronizado e reconhecido mundialmente para avaliar a qualidade e as características sensoriais de grãos de café. Profissionais como produtores, compradores, torrefadores e baristas utilizam essa técnica para analisar de forma objetiva o aroma, sabor, acidez, corpo e finalização da bebida.

Originalmente, o cupping era usado por comerciantes para verificar a qualidade e a consistência dos lotes de café que pretendiam comprar, garantindo que não houvesse defeitos. Com o crescimento do mercado de cafés especiais, a prática foi adotada para identificar e descrever os sabores complexos e as nuances de cada café. A Specialty Coffee Association (SCA) estabeleceu diretrizes que hoje são amplamente aceitas internacionalmente.

O cupping segue um protocolo rigoroso para garantir que a avaliação seja justa e consistente. Todas as amostras de café são submetidas às mesmas condições de torra, moagem, proporção de café para água e temperatura da água.



Figuras 16 e 17. Torrador de amostra e xicara com café infundido –
Fonte: Lucas Broedel

3. Concurso de Qualidade: Validação e Reconhecimento da Excelência

A participação em concursos de qualidade de café tem sido um pilar fundamental para a validação de nossas práticas e para o reconhecimento do potencial do Conilon de Sooretama. As vitórias consecutivas em 2023 e 2024 no Concurso de Qualidade do Café Conilon de Sooretama não são apenas conquistas pessoais, mas um reflexo do trabalho árduo e da dedicação de toda a família no Sítio Recanto Sonhado. Esses concursos desempenham um papel crucial no fomento à melhoria contínua da qualidade, estabelecendo padrões de excelência e promovendo a troca de experiências entre os produtores. A avaliação sensorial por provadores certificados fornece um feedback objetivo, que nos auxilia no aprimoramento constante de nossos processos. A visibilidade obtida por meio dessas premiações contribui significativamente para a valorização do café Conilon de Sooretama no mercado, abrindo novas oportunidades comerciais e fortalecendo a cadeia produtiva regional. É a prova de que, com a aplicação de conhecimento técnico-científico e um manejo rigoroso, é possível elevar o patamar de qualidade do Conilon, desmistificando a percepção de que esta variedade se restringe a café de menor valor.



Figuras 18 e 19. Quarto e quinto concurso de qualidade do café conilon de Sooretama – Fonte: Lucas Broedel

4. O Legado da Família e o Futuro do Conilon Especial

Minha jornada na cafeicultura de Conilon em Sooretama é um testemunho da força da tradição familiar aliada à inovação científica. A experiência consolidada no Sítio Recanto Sonhado, enriquecida pelo inestimável conhecimento transmitido por meu avô e pelas gerações anteriores, reforça a convicção de que o café Conilon possui um potencial ainda inexplorado no cenário dos cafés especiais. As aplicações de técnicas agrônômicas avançadas, o manejo criterioso de pós-colheita e a participação ativa em concursos de qualidade são pilares para a elevação do padrão de bebida desta variedade.

Os resultados alcançados, incluindo o bicampeonato no Concurso de Qualidade de Café Conilon de Sooretama, demonstram que a cafeicultura de Conilon pode ser altamente rentável e sustentável. Minha trajetória representa a nova geração de produtores rurais brasileiros: tecnicamente qualificados,

cientificamente embasados, mas profundamente conectados com suas raízes familiares e tradições. Essa combinação de educação formal, experiência prática e valores familiares gera resultados excepcionais na agricultura brasileira. Espera-se que este relato contribua para o debate e o desenvolvimento de novas abordagens na cafeicultura de Conilon, inspirando outros produtores a explorar o potencial de suas lavouras e a consolidar o Espírito Santo como um polo de excelência em cafés especiais. O futuro do Conilon de qualidade reside na colaboração entre produtores, pesquisadores e o mercado, visando aprimorar continuamente os processos e expandir o reconhecimento dessa bebida singular.

CAPÍTULO 7

Qualidade na Altitude

Roberta Reis Rosa Aguilar
Júlio Antônio Saraiva Aguilar

1. Nossas raízes no Norte Capixaba

A nossa história com o café começou muito antes do Khas Café existir e, curiosamente, não começou com o café. Antes do som das peneiras, era o mugido do gado que ecoava nas manhãs de Cristal do Norte, em Pedro Canário, no extremo norte do Espírito Santo.

A família Aguilar cresceu entre pastos e currais, na rotina do gado leiteiro, onde o trabalho começava antes do sol nascer e terminava só quando o campo silenciava. Foi nesse cenário que Júlio Aguilar, engenheiro agrônomo formado pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), aprendeu os primeiros fundamentos da terra e começou a transformá-los.

Quando retornou à fazenda da família, trouxe um olhar técnico e inquieto sobre o potencial da propriedade. Aos poucos, o gado foi cedendo espaço para novas culturas: cana-de-açúcar, banana, eucalipto, cacau e, por fim, o café conilon, que chegou discreto e se firmou com força.

O conilon se adaptou perfeitamente ao clima quente e ao solo fértil do norte capixaba, tornando-se o novo coração da fazenda. O café trouxe outra dinâmica ao campo, o ritmo das colheitas, o manejo e o prazer de acompanhar

o amadurecimento dos frutos. A família se envolveu em todas as etapas, e o que antes era apenas produção passou a ser também aprendido.

Foi nesse ambiente que amadureceu a ideia de transformar o cultivo em propósito. O conilon deixou de ser uma cultura de sustento e se tornou um ponto de partida para algo maior, uma ponte entre o trabalho agrícola e uma nova forma de ver o território. Essa transição plantou as sementes do que viria anos depois: o Khas Café, nas montanhas, mas com raízes firmes no norte capixaba.

2. A decisão de subir a serra

Depois de anos dedicados ao conilon, sentimos que era hora de viver outro ciclo. A terra nos ensina a perceber quando o tempo de mudança chega, e o nosso chegou com o desejo de viver mais perto das montanhas e do clima ameno que sempre nos encantou.

A decisão de subir a serra foi mais simbólica do que geográfica. Buscávamos um novo ritmo, um modo de viver e produzir em equilíbrio com o ambiente. Em Venda Nova do Imigrante encontramos esse lugar: altitude, tradição agrícola e uma paisagem que inspira.

As montanhas nos receberam com generosidade. O verde intenso, o perfume das flores e o frio constante mostraram que ali o café tinha outro comportamento. O mesmo fruto que no norte amadurecia rápido e sob sol forte, nas montanhas se desenvolvia lentamente, ganhando equilíbrio e doçura.

Começamos então a cultivar café arábica, observando o solo, o clima e o comportamento das plantas. Cada safra era uma descoberta. O conilon, que nos formou no norte, abria caminho para o arábica, que florescia na altitude. Juntos, eles passaram a representar o que somos: tradição e descoberta, raiz e altura.

Com o tempo, percebemos que o que estávamos criando não era apenas uma propriedade, mas um espaço de experimentação. A agricultura se unia à curiosidade e a técnica encontrava a sensibilidade. Assim nasceu a semente do Khas Café, um projeto que traduz o encontro entre chão e céu, corpo e ideia, produção e criação.

3. O encontro entre ciência e território

Quando nos estabelecemos em Venda Nova, sabíamos que o café continuaria conosco. Mas, dessa vez, ele viria acompanhado da ciência. Nos aproximamos da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), e dessa parceria nasceu a ideia de ceder parte da propriedade para um experimento de Conilon em altitude. O conilon havia marcado nossa história no norte e, agora, voltava renovado às montanhas, uma ponte entre passado e futuro.

Quando as primeiras mudas foram plantadas, sentimos que aquele projeto tinha um valor simbólico: unir o saber empírico da lavoura ao conhecimento científico. A equipe da UFES, liderada pelo professor Fábio Partelli, trouxe uma nova perspectiva, a da pesquisa como aliada do produtor. E nós aprendemos que inovação no campo não está apenas em máquinas, mas na coragem de abrir espaço para o conhecimento.

O experimento transformou o território em laboratório vivo. Cada muda plantada ali é um lembrete de que o café é um elo entre gerações, entre saberes e entre formas de olhar o mundo.

4. O Khas Café

O Khas Café nasceu desse cruzamento entre o campo e a criação. Percebemos que o café não era apenas uma cultura agrícola, mas uma linguagem, uma forma de contar histórias sobre o território, o tempo e as pessoas.

A palavra Khas significa “especial”, “singular”, “feito com cuidado”. E foi exatamente isso que buscamos: um projeto criativo e sensível, sem perder a verdade do campo.

O Khas é resultado da união de três olhares: Júlio Aguiar, com a visão agrônômica e o domínio da produção; Ddaniela Aguiar, artista plástica, com a sensibilidade estética e o olhar sobre as formas da natureza; e eu, Roberta, com o foco em branding, turismo e narrativa, traduzindo o café em experiência.

Juntos, criamos um espaço que une café, arte e natureza. As construções dialogam com o entorno, o paisagismo valoriza as espécies locais e a arquitetura convida à contemplação. O Khas é mais do que uma propriedade rural: é um lugar de aprendizado e troca. Um manifesto sobre simplicidade, conexão e o valor da qualidade construída com tempo e cuidado.

5. A Alquimia do Café: quando a pesquisa vira experiência

Com o avanço da produção e das pesquisas, nasceu o desejo de compartilhar o que vivíamos. Assim surgiu a Experiência Alquimia do Café, um roteiro sensorial que aproxima o visitante da nossa rotina e do território.

Durante a visita, o público percorre as lavouras, observa o manejo e participa de uma degustação comparativa entre o conilon de altitude e o arábica. Mais do que explicar, buscamos fazer o visitante sentir o café, entender o trabalho, o clima e o tempo que moldam o sabor.

A Alquimia traduz o que somos: técnica e emoção. Julio traz o olhar agrônômico, Daniela transforma o ambiente com arte e eu construo a narrativa que conecta o visitante a essa vivência. O resultado é uma experiência que desperta curiosidade, respeito e consciência sobre o café.

Muitos visitantes chegam apenas por curiosidade e saem com outro olhar sobre o que é produzir com propósito. A Alquimia é isso: uma pausa, um encontro e uma forma de reconectar as pessoas ao essencial.

6. O café nas Montanhas Capixabas

Produzir café nas montanhas é um exercício diário de observação e paciência. Aqui, o clima muda rápido, o amadurecimento é lento e cada safra traz um novo desafio. A altitude exige atenção, mas recompensa com cafés de sabor equilibrado e aromas complexos.

As lavouras do Khas crescem entre áreas de alecrim, cerejeiras, amoreiras, abacateiros e vetiver. Essas combinações criam um microclima que favorece a biodiversidade e a qualidade. Tudo é planejado para equilibrar produção e preservação.

Quando chega a florada, o ar se enche de perfume, um anúncio de que o ciclo recomeça. Cada floração renova nossa esperança e reafirma o compromisso com o cultivo sustentável e consciente.

Mais do que cafés especiais, produzimos cafés com identidade. Cada grão carrega as características do território e o cuidado de quem o cultiva. É isso que nos move: ver o Espírito Santo reconhecido pela qualidade e pela originalidade de seus cafés.

7. Entre raízes e altitude

O café foi o fio que uniu todas as fases da nossa história. Do gado leiteiro no norte às lavouras de altitude nas montanhas, cada etapa nos ensinou a reinventar.

O conilon nos deu força e estabilidade. O arábica trouxe sutileza e descoberta. E juntos, eles representam quem somos: enraizados no passado e voltados para o futuro.

O Khas Café simboliza esse encontro. Um lugar onde o café é cultura viva e onde cada detalhe, da plantação à experiência, traduz o respeito pelo território e pelas pessoas.

A qualidade na altitude é o resultado de tudo isso: trabalho, tempo e aprendizado contínuo. Cada safra carrega um pedaço da nossa história e cada xícara é uma forma de compartilhá-la.

“A qualidade não nasce apenas da altitude. Ela nasce da terra, do tempo e do cuidado com que se cultiva.”

CAPÍTULO 8

Cafeicultura do Futuro: A Importância Estratégica da Diversidade Genética do *Coffea canephora*

Leandro Mendel da Cruz
Fábio Luiz Partelli

1 Introdução

O *Coffea canephora* desempenha um papel fundamental na produção global de café, sendo responsável por uma parcela significativa do mercado, especialmente em países como Brasil, Vietnã, Indonésia, Uganda e Índia. A notável capacidade de adaptação desta espécie a diferentes ambientes e sua resiliência a desafios agrícolas históricos estão intrinsecamente ligadas à sua vasta diversidade genética. Este patrimônio genético, moldado ao longo de milênios de evolução, é hoje o recurso mais estratégico para enfrentar as pressões sem precedentes do século XXI, como as mudanças climáticas, a intensificação de pragas e doenças e a crescente demanda por uma produção sustentável.

Este capítulo aborda um pouco do universo da diversidade genética do *C. canephora*, explorando sua importância fundamental, a complexa relação com os desafios climáticos e as ameaças que colocam em risco sua preservação. Ao tratar desde os fundamentos biológicos até as mais recentes aplicações de ferramentas genômicas, busca-se oferecer um panorama

abrangente sobre como a conservação e o manejo inteligente dessa variabilidade são cruciais para garantir não apenas a sobrevivência, mas o futuro próspero da cafeicultura. Através desta análise, ficará claro que o futuro do café depende da nossa capacidade de proteger, compreender e utilizar sabiamente o seu mais valioso tesouro: seu próprio genoma.

2 Diversidade Genética: Fundamentos e Importância

A diversidade genética, conceito que descreve a amplitude de variação em uma espécie, desde alelos individuais a combinações genômicas complexas, representa um pilar para a adaptabilidade, evolução e resiliência das populações frente a pressões seletivas, como mudanças climáticas e estresses bióticos e abióticos (Prasad e Chakraborty, 2023). No contexto do melhoramento e da conservação de plantas, essa variabilidade é imprescindível, fornecendo a matéria-prima para o desenvolvimento de cultivares mais produtivas e resilientes, sendo, portanto, um recurso estratégico para a segurança alimentar, a sustentabilidade agrícola e a gestão de recursos naturais (Begna et al., 2022). Para o *C. canephora*, a diversidade genética é um recurso indispensável para a obtenção de genótipos superiores, adaptados a distintas condições ambientais e resistentes a pragas e doenças, garantindo assim a sustentabilidade da cafeicultura (Silva et al., 2025).

A utilização de ferramentas moleculares avançadas tem se mostrado fundamental para explorar e aplicar essa diversidade. Segundo Santos et al. (2022), avanços como o sequenciamento completo do genoma de espécies como *C. arabica* e *C. canephora* permitiram identificar genes cruciais para a tolerância a estresses abióticos, ressaltando o potencial de espécies e acessos selvagens como fontes vitais de genes de resistência. De forma complementar, Ariyoshi et al. (2022), destacam que os estresses bióticos demandam atenção contínua devido à coevolução entre hospedeiros e patógenos, e que as ferramentas genéticas são essenciais para o melhoramento preventivo,

permitindo o desenvolvimento de cultivares de elite com resistência a múltiplos patógenos. A adoção dessas variedades melhoradas é, portanto, crucial para reduzir o uso de defensivos e promover uma produção mais sustentável.

Estudos de caracterização genética confirmam a vasta riqueza presente em *C. canephora*. Análises com marcadores microssatélites, por exemplo, identificaram elevados níveis de polimorfismo e heterozigosidade, evidenciando uma base genética robusta para programas de melhoramento (Sousa et al., 2022). Adicionalmente, o mapeamento genético revelou que muitas variedades cultivadas contêm segmentos de ascendência selvagem, resultado de hibridizações históricas que enriqueceram a composição genética das atuais cultivares de elite (Vi et al., 2023). No Brasil, a diversidade genética do café Conilon tem sido amplamente explorada em estudos fenotípicos e moleculares, que demonstram o grande potencial da espécie para o desenvolvimento de variedades mais produtivas e tolerantes a estresses (Zaidan et al., 2023). Instituições como o Incaper, a Ufes, o IAC e a Embrapa, dentre outras, desempenham um papel central na conservação e utilização dessa variabilidade, mantendo coleções de germoplasma que são essenciais para o desenvolvimento de novas cultivares adaptadas às diferentes condições de cultivo e às exigências do mercado (Tadeu et al., 2024).

3 Relação entre diversidade genética e mudanças climáticas

A relação entre a diversidade genética de *C. canephora* e as mudanças climáticas é multifacetada, envolvendo desafios e oportunidades para a adaptação e conservação da espécie. A cultura enfrenta ameaças significativas decorrentes das alterações no clima, como o aumento das temperaturas globais e a modificação dos padrões de precipitação, fatores que podem impactar diretamente sua produtividade e qualidade (Salvador et al., 2025). Os impactos fisiológicos do estresse hídrico, por exemplo, manifestam-se pela

redução da fotossíntese e da eficiência no uso da água, o que limita a assimilação de carbono e aumenta a vulnerabilidade da planta à seca (Max et al., 2022). Genótipos de alto rendimento na região amazônica, por exemplo, demonstraram uma baixa margem de segurança hidráulica, tornando-os particularmente suscetíveis à falha hidráulica nas folhas e à consequente quebra de produtividade (Max et al., 2022).

A resposta ao estresse hídrico varia significativamente entre os genótipos, com alguns demonstrando maior resiliência a déficits hídricos moderados, enquanto outros apresentam sensibilidade acentuada a condições severas de seca. Estudos transcriptômicos revelaram a expressão diferencial de genes relacionados à tolerância à seca, especialmente aqueles envolvidos nos processos de sinalização do ácido abscísico (ABA), destacando a complexidade das respostas genótípicas (Marques et al., 2024). Em Camarões, a ampla variabilidade genética de *C. canephora* confere à espécie um certo grau de resiliência, permitindo sua adaptação a condições ambientais desafiadoras, como o aumento da pressão de pragas intensificado pelas mudanças climáticas (Kamga et al., 2022). Essa diversidade é, portanto, essencial para programas de melhoramento que visam desenvolver variedades mais adaptadas.

No Brasil, o estado do Espírito Santo enfrentou um severo evento de seca que se iniciou no segundo semestre de 2014 e perdurou ao longo de 2015, causando perdas expressivas na produtividade agrícola. Recentemente, a safra de 2024 no estado também registrou uma queda acentuada na produção, desta vez como consequência de intensas ondas de calor que comprometeram o desenvolvimento dos cafezais. De forma análoga, o Vietnã, maior produtor mundial de *C. canephora*, tem sofrido com períodos de grande adversidade climática. Na década de 2010, por exemplo, o país experimentou uma redução na produtividade devido ao esgotamento dos recursos hídricos, um reflexo da estiagem que atingiu a região. O cenário de vulnerabilidade hídrica persistiu

na década seguinte, quando novas secas severas e temperaturas elevadas voltaram a impactar negativamente as lavouras, resultando em quebras de safra e pressionando o mercado internacional. Os danos causados pela seca e pelas altas temperaturas impõem estresses fisiológicos significativos ao cafeeiro. Estudos sobre o estresse hídrico revelaram variações intraespecíficas na tolerância à seca, com redução nas taxas de crescimento relativo e na área foliar total, o que evidencia uma complexa compensação entre o crescimento da planta e sua capacidade de tolerância a essas condições (Kiwuka et al., 2021). Tais estresses, de maneira geral, afetam diretamente o enchimento dos grãos, a fotossíntese e a saúde geral da planta, comprometendo não apenas o volume da colheita, mas também a qualidade final da bebida.

Diante desses desafios, a diversidade genética da espécie emergiu como um fator crucial para mitigar os impactos da seca. Em resposta a eventos climáticos extremos, foram implementadas medidas de mitigação, como o uso de sistemas agroflorestais, a construção de pequenos reservatórios, o investimento em irrigação e o florestamento para melhorar a disponibilidade hídrica. Eventos extremos como a seca, mostram portanto, tanto a vulnerabilidade quanto o potencial adaptativo do *C. canephora*, sublinhando a urgência no desenvolvimento de variedades resilientes e na implementação de práticas agrícolas sustentáveis (Borgo et al., 2024).

A pesquisa científica tem aprofundado o entendimento sobre as bases genéticas da adaptação. Estudos genômicos identificaram polimorfismos de nucleotídeo único (SNPs) associados à adaptação climática, incluindo genes relacionados às respostas ao estresse ambiental e à biossíntese de cafeína (Aquino et al., 2022). Populações nativas, particularmente em Uganda, abrigam grupos genéticos distintos em diferentes zonas climáticas, representando um valioso reservatório de características adaptativas que podem ser exploradas para aumentar a resiliência a altas temperaturas e déficits hídricos (Kiwuka et al., 2021). Contudo, apesar desse potencial,

projeções indicam que a adequação do habitat para a espécie poderá diminuir até 2050, expondo algumas populações a elevados riscos de má adaptação (Tournebize et al., 2022).

Para enfrentar os desafios futuros, a plasticidade fenotípica de *C. canephora*, que permite ajustar seu desempenho em diferentes ambientes, torna a espécie uma alternativa viável (Ferrão et al., 2024b). A integração de estratégias de melhoramento genômico assistido é sugerida como forma de otimizar o desenvolvimento de cultivares robustas (Ferrão et al., 2024a). Nesse sentido, estratégias de conservação *in situ* e *ex situ* são fundamentais para preservar os recursos genéticos da espécie (Kiwuka et al., 2021). A diversidade genética de *C. canephora* constitui, assim, um ativo estratégico para mitigar os impactos climáticos, ressaltando a necessidade de esforços coordenados para sua conservação e utilização sustentável em programas de melhoramento, garantindo a sustentabilidade da cafeicultura global (Tadeu et al., 2024).

4 Ameaças à diversidade genética

A diversidade genética de *C. canephora*, pilar para a adaptabilidade e resiliência da cafeicultura, encontra-se sob crescente ameaça devido a fatores interligados como a hibridização descontrolada, o desmatamento, as mudanças climáticas e a expansão de plantios com base genética estreita. Tais fatores intensificam a perda de variabilidade, comprometendo a sustentabilidade da produção ao reduzir a capacidade adaptativa da espécie e torná-la mais vulnerável a pragas, doenças e eventos climáticos extremos. A conservação e o manejo sustentável de seus recursos genéticos são, portanto, essenciais para garantir a resiliência das lavouras a longo prazo.

A hibridização sem controle representa um risco significativo à integridade genética de *C. canephora*, especialmente pela introdução de cultivares de diferentes grupos genéticos. Estudos na Costa do Marfim, por

exemplo, demonstraram que o pólen do grupo congolês apresenta maior eficiência na polinização de plantas do grupo guineense nativo, resultando na erosão de sua pureza genética (Gnapi et al., 2022). Uma situação análoga foi observada em Uganda, onde a introdução de variedades congolêses gerou um fluxo gênico expressivo entre populações selvagens e cultivadas, com potencial para diluir a diversidade local (Kiwuka et al., 2021). Essa tendência se repete em outras regiões: na Indonésia, a seleção de genótipos para enxertia tem levado a uma base genética restrita (Syafaruddin et al., 2014), e no Equador, o predomínio de germoplasma de origem congolêsa limita as fontes genéticas disponíveis (Loor Solórzano et al., 2017). A complexidade desses processos é acentuada pela diferenciação genética histórica na zona guineo-congolêsa, influenciada tanto por mudanças climáticas passadas quanto por intervenções humanas recentes (C. Gomez et al., 2009).

O desmatamento, particularmente nos centros de diversidade como as florestas tropicais africanas, constitui outra séria ameaça. A perda de habitat não apenas reduz o tamanho das populações e interrompe o fluxo gênico, mas também promove o isolamento genético, agravando problemas como a endogamia e a perda de resiliência (Gnapi et al., 2022). A destruição florestal elimina genótipos únicos, potencialmente valiosos para futuros programas de melhoramento, e compromete serviços ecossistêmicos cruciais para a cultura, como a polinização (Depecker et al., 2023; Salvador et al., 2025). Embora alguma diversidade ainda persista em florestas perturbadas, como em Yangambi, a degradação contínua representa um grave risco à estrutura genética das populações naturais (Depecker et al., 2023).

A expansão de lavouras com um ou poucos genótipos, prática comum que visa à eficiência produtiva, agrava a vulnerabilidade da cafeicultura. A uniformidade genética eleva o risco de colapsos produtivos, pois torna as plantações mais suscetíveis a surtos de pragas, doenças e aos impactos das mudanças climáticas (Tapaça et al., 2023; Ferrão et al., 2024a). A limitada

diversidade das cultivares comerciais restringe sua capacidade de adaptação a temperaturas extremas e períodos de seca, que não só afetam o desenvolvimento das plantas, mas também podem intensificar a propagação de patógenos (Sseremba et al., 2023).

Diante desse cenário, a conservação e a utilização estratégica da variabilidade genética são imperativas. A inclusão de parentes silvestres e espécies subutilizadas em programas de melhoramento é uma estratégia fundamental para ampliar a base genética e fortalecer a resiliência da cultura (Sseremba et al., 2023; Tapaça et al., 2023; Salvador et al., 2025). Embora a modernização agrícola e o uso de métodos como a reprodução por mutação e a transgenia possam ampliar a variabilidade, eles também podem paradoxalmente acelerar a erosão genética se não forem bem gerenciados (Sharma et al., 2024). Portanto, é essencial que os esforços de melhoramento sejam combinados com estratégias robustas de conservação *in situ* e *ex situ*, como a manutenção de bancos de germoplasma. Ações integradas que aliam conservação, práticas de manejo sustentável e reprodução seletiva assistida por genômica são indispensáveis para mitigar os impactos e assegurar a sustentabilidade do café em um contexto de crescentes pressões ambientais.

5 Considerações Finais

A diversidade genética do *C. canephora* é um pilar insubstituível para a sustentabilidade da cafeicultura. Essa variabilidade, presente desde as populações silvestres até os bancos de germoplasma, é a base para o desenvolvimento de cultivares resilientes a estresses bióticos, abióticos e às mudanças climáticas. As crescentes ameaças, como eventos climáticos extremos, hibridização descontrolada e desmatamento, revelam a vulnerabilidade do sistema produtivo e a urgência de proteger e manejar esse patrimônio genético.

Para tanto, o futuro da cultura depende de uma abordagem integrada que alinhe a ciência genômica com robustas práticas de conservação *in situ* e *ex situ*. A colaboração entre pesquisadores, produtores e formuladores de políticas é imperativa para garantir que essa base genética seja continuamente preservada e enriquecida. A valorização e aplicação inteligente da diversidade genética são, portanto, o caminho para assegurar a resiliência, a produtividade e a sustentabilidade do café para as futuras gerações.

6 Referências

- Aquino, S.O. de, Kiwuka, C., Tournebize, R., Gain, C., Marraccini, P., Mariac, C., Bethune, K., Couderc, M., Cubry, P., Andrade, A.C., Lepelley, M., Darracq, O., Crouzillat, D., Anten, N., Musoli, P., Vigouroux, Y., de Kochko, A., Manel, S., François, O., Poncet, V., 2022. Adaptive potential of *Coffea canephora* from Uganda in response to climate change. *Molecular Ecology* 31, 1800–1819. <https://doi.org/10.1111/mec.16360>
- Ariyoshi, C., Oliveira, F.F., Shigueoka, L.H., Silva, A.G., Arias, A.G., Villalta-Villalobos, J., Ivamoto-Suzuki, S.T., Sera, G.H., Caixeta, E.T., Rocha, M.R., Moraes, W.B., Partelli, F.L., Pereira, L.F.P., 2022. Current Challenges and Genomic Advances Toward the Development of Coffee Genotypes Resistant to Biotic Stress, in: *Genomic Designing for Biotic Stress Resistant Technical Crops*. Springer International Publishing, Cham, pp. 159–189. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09293-0_4
- Begna, T.B., Gichile, H.G., Yali, W.Y., 2022. Genetic Diversity and Its Impact in Enhancement of Crop Plants. *GJAR* 10, 13–25. <https://doi.org/10.37745/gjar.2013/vol10no2pp.13-25>
- Borgo, L., Rabêlo, F.H.S., Marchiori, P.E.R., Guilherme, L.R.G., Guerra-Guimarães, L., Resende, M.L.V.D., 2024. Impact of Drought, Heat, Excess Light, and Salinity on Coffee Production: Strategies for Mitigating Stress Through Plant Breeding and Nutrition. *Agriculture* 15, 9. <https://doi.org/10.3390/agriculture15010009>
- C. Gomez, S. Dussert, P. Hamon, S. Hamon, A. Kochko, V. Poncet, 2009. Current genetic differentiation of *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehn in the Guineo-Congolian African zone: cumulative impact of ancient climatic changes and recent human activities. *BMC Evolutionary Biology* 9, 167–167. <https://doi.org/10.1186/1471-2148-9-167>
- Depecker, J., Verleysen, L., Asimonyio, J.A., Hatangi, Y., Kambale, J.-L., Mwanga Mwanga, I., Ebele, T., Dhed’a, B., Bawin, Y., Staelens, A., Stoffelen, P., Ruttink, T., Vandelook, F., Honnay, O., 2023. Genetic diversity and structure in wild Robusta coffee (*Coffea canephora* A. Froehner) populations in Yangambi (DR Congo) and

- their relation to forest disturbance. *Heredity* 130, 145–153. <https://doi.org/10.1038/s41437-022-00588-0>
- Ferrão, M.A.G., da Fonseca, A.F.A., Volpi, P.S., de Souza, L.C., Comério, M., Filho, A.C.V., Riva-Souza, E.M., Munoz, P.R., Ferrão, R.G., Ferrão, L.F.V., 2024a. Genomic-assisted breeding for climate-smart coffee. *Plant Genome* 17. <https://doi.org/10.1002/tpg2.20321>
- Ferrão, M.A.G., Riva-Souza, E.M., Azevedo, C., Volpi, P.S., Fonseca, A.F.A., Ferrão, R.G., Montagnon, C., Ferrão, L.F.V., 2024b. Robust and smart: Inference on phenotypic plasticity of *Coffea canephora* reveals adaptation to alternative environments. *Crop Science* csc2.21298. <https://doi.org/10.1002/csc2.21298>
- Gnapi, D.E., Pokou, D.N., Legnate, H., Dapeng, Z., Montagnon, C., Bertrand, B., N’guetta, A.S.-P., 2022. Is the genetic integrity of wild *Coffea canephora* from Ivory Coast threatened by hybridization with introduced coffee trees from Central Africa? *Euphytica* 218, 62. <https://doi.org/10.1007/s10681-022-03004-0>
- Kamga, E., Kamga, A., Tabi Oben, F., Tchemtchoua, E., Etame Kossi, G., 2022. Culture du café robusta (*Coffea canephora*): risques liés à la variabilité et au changement climatique dans le bassin de production du Moungo, Littoral-Cameroun. *Int. J. Bio. Chem. Sci* 16, 353–366. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v16i1.30>
- Kiwuka, C., Goudsmit, E., Tournebize, R., De Aquino, S.O., Douma, J.C., Bellanger, L., Crouzillat, D., Stoffelen, P., Sumirat, U., Legnate, H., Marraccini, P., De Kochko, A., Andrade, A.C., Mulumba, J.W., Musoli, P., Anten, N.P.R., Poncet, V., 2021. Genetic diversity of native and cultivated Ugandan Robusta coffee (*Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner): Climate influences, breeding potential and diversity conservation. *PLoS ONE* 16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245965>
- Loor Solórzano, R.G., De Bellis, F., Leroy, T., Plaza, L., Guerrero, H., Subia, C., Calderón, D., Fernández, F., Garzón, I., Lopez, D., Vera, D., 2017. Revealing the Diversity of Introduced *Coffea canephora* Germplasm in Ecuador: Towards a National Strategy to Improve Robusta. *The Scientific World Journal* 2017, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2017/1248954>
- Marques, I., Fernandes, I., Paulo, O.S., Batista, D., Lidon, F.C., Rodrigues, A.P., Partelli, F.L., DaMatta, F.M., Ribeiro-Barros, A.I., Ramalho, J.C., 2024. Transcriptomic Analyses Reveal That *Coffea arabica* and *Coffea canephora* Have More Complex Responses under Combined Heat and Drought than under Individual Stressors. *IJMS* 25, 7995. <https://doi.org/10.3390/ijms25147995>
- Max, A.C., Loram-Lourenço, L., Silva, F.G., Souza, L.H.M. de, Dias, J.R.M., Espindula, M.C., Farnese, F.S., Hammond, W.J., Torres-Ruiz, J.M., Cochard, H., Menezes-Silva, P.E., 2022. A bitter future for coffee production? Physiological traits associated with yield reveal high vulnerability to hydraulic failure in *Coffea canephora*. *Plant Cell and Environment* 46, 764–779. <https://doi.org/10.1111/pce.14514>
- Prasad, K.M., Chakraborty, N.R., 2023. GENETIC DIVERSITY IN AGRICULTURAL PLANTS, in: Debnath, Dr.S., Manjula, Dr.I.K., Shah, Dr.K.R., Kumar, Dr.A. (Eds.), *Futuristic Trends in Biotechnology Volume 2 Book 26*. Iterative International

- Publishers, Selfypage Developers Pvt Ltd, pp. 111–125. <https://doi.org/10.58532/V2BS26CH8>
- Salvador, H.P., Berilli, A.P.C.G., Rodrigues, W.P., Mazzafera, P., Partelli, F.L., 2025. A climate change perspective on the selection, development, and management of *Coffea canephora* genotypes, in: *Advances in Botanical Research*. Elsevier, pp. 283–315. <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2024.04.005>
- Santos, T.B., Ferreira, M.F.S., Marques, I., Oliveira, S.C., Zaidan, I.R., Oliveira, M.G., Rodrigues, W.P., Ribas, A.F., Guyot, R., Ramalho, J.C., Ribeiro-Barros, A.I., Pereira, L.F.P., Partelli, F.L., 2022. Current Challenges and Genomic Advances Towards the Development Resilient Coffee Genotypes to Abiotic Stresses, in: *Genomic Designing for Abiotic Stress Resistant Technical Crops*. Springer International Publishing, Cham, pp. 41–69. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05706-9_3
- Sharma, V., Kordrostami, M., Maan, S.S., Sarsu, F., Penna, S., 2024. Innovations in Artificial Induction of Plant Genetic Diversity, in: Al-Khayri, J.M., Jain, S.M., Penna, S. (Eds.), *Sustainable Utilization and Conservation of Plant Genetic Diversity, Sustainable Development and Biodiversity*. Springer Nature Singapore, Singapore, pp. 259–287. https://doi.org/10.1007/978-981-99-5245-8_8
- Silva, A.N.R., Rocha, R.B., Moraes, A.D.O., Espindula, M.C., Teixeira, A.L., Alves, E.A., 2025. Unraveling the genetic diversity of coffee processing traits in *Coffea canephora*. *Cienc. Rural* 55, e20240056. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20240056>
- Sousa, P., Vieira, H., Santos, E., Viana, A., Boaechat, M., Partelli, F., 2022. *Coffea canephora*: Heterotic Crosses Indicated by Molecular Approach. *Plants* 11. <https://doi.org/10.3390/plants11223023>
- Sseremba, G., Tongoona, P., Musoli, P., Eleblu, J., Melomey, L.D., Bitalo, D., Atwijukire, E., Mulindwa, J., Aryatwijuka, N., Muhumuza, E., Kobusinge, J., Magambo, B., Kagezi, G., Danquah, E., Kizito, E., Kyalo, G., Iyamulemye, E., Arinaitwe, G., 2023. Viability of Deficit Irrigation Pre-Exposure in Adapting Robusta Coffee to Drought Stress. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030674>
- Syafaruddin, S., Randriani, E., Dani, D., Sulistyorini, I., Pabendon, M.B., 2014. Genetic Variability of 15 Robusta Coffee Genotypes Selected by Farmer Based on SSRs Markers. *JTIDP* 1, 87. <https://doi.org/10.21082/jtidp.v1n2.2014.p87-94>
- Tadeu, H.C., Ximenes, V.F., Lopes, M.T.G., Espindula, M.C., Alves, A.P.D.C., Borém, F.M., 2024. Analysis of bioactive compounds, organic acids, and genetic parameters of ten amazonian robusta cultivars. *Rev. Caatinga* 37, e12017. <https://doi.org/10.1590/1983-21252024v37i12017rc>
- Tapaça, I.D.P.E., Mavuque, L., Corti, R., Pedrazzani, S., Maquia, I.S.A., Tongai, C., Partelli, F.L., Ramalho, J.C., Marques, I., Ribeiro-Barros, A.I., 2023. Genomic Evaluation of *Coffea arabica* and Its Wild Relative *Coffea racemosa* in Mozambique: Settling Resilience Keys for the Coffee Crop in the Context of Climate Change. *Plants* 12, 2044. <https://doi.org/10.3390/plants12102044>
- Tournebize, R., Borner, L., Manel, S., Meynard, C.N., Vigouroux, Y., Crouzillat, D., Fournier, C., Kassam, M., Descombes, P., Tranchant-Dubreuil, C., Parrinello, H.,

- Kiwuka, C., Sumirat, U., Legnate, H., Kambale, J., Sonké, B., Mahinga, J.C., Musoli, P., Janssens, S.B., Stoffelen, P., De Kochko, A., Poncet, V., 2022. Ecological and genomic vulnerability to climate change across native populations of Robusta coffee (*Coffea canephora*). *Global Change Biology* 28, 4124–4142. <https://doi.org/10.1111/gcb.16191>
- Vi, T., Vigouroux, Y., Cubry, P., Marraccini, P., Phan, H.V., Khong, G.N., Poncet, V., 2023. Genome-Wide Admixture Mapping Identifies Wild Ancestry-of-Origin Segments in Cultivated Robusta Coffee. *Genome Biology and Evolution* 15, evad065. <https://doi.org/10.1093/gbe/evad065>
- Zaidan, I.R., Ferreira, M.F.D.S., Noia, L.R., De Arruda, V.C., Pereira Do Couto, D., Moro, G.L.J., Silva, M.A., Santos, J.G., Braz, R.A., Azevedo, C.F., Ferreira, A., 2023. Germplasm characterization of half-sib families from seminal matrices of *Coffea canephora*. *Agronomy Journal* 115, 108–122. <https://doi.org/10.1002/agj2.21224>

CAPÍTULO 9

Desafios e possibilidades para o melhoramento genético do cafeeiro conilon como estratégia mitigadora das mudanças climáticas

João Felipe de Brites Senra

Tafarel Victor Colodetti

Wagner Nunes Rodrigues

Idalina Sturião Milheiros

Thalita Sousa Silva

1. Introdução

As mudanças climáticas são o ponto focal de diversas discussões científicas, econômicas, políticas e públicas (Abrahams, 2020), pois tornaram-se um desafio para a humanidade em virtude dos efeitos locais, regionais e globais (Santos et al., 2022). Os impactos ambientais, sociais, políticos e econômicos já estão sendo observados, como mudanças no ciclo hidrológico, inundações frequentes, secas e maior incidência de pragas e doenças (IPCC, 2021).

Para a cafeicultura do conilon, observa-se que genótipos/cultivares recomendadas estão rapidamente perdendo sua adaptação e, com o tempo, agravando a bienalidade produtiva. Materiais genéticos de uso consolidado em certas regiões estão enfrentando restrições hídricas e térmicas cada vez mais rigorosas. Pragas e doenças que eram de menor incidência estão se

tornando mais frequentes, com o agravante de não existir um manejo recomendado e genótipos resistentes.

Para mitigação deste cenário, os programas de melhoramento genético são partícipes fundamentais no desenvolvimento de estratégias de convivência ou superação dos efeitos negativos das mudanças climáticas. Nesse contexto, citam-se três estratégias fundamentais aplicadas pelos programas de melhoramento genético do cafeeiro conilon: desenvolvimento de cultivares/genótipos com tolerância ao estresse hídrico; desenvolvimento de cultivares/genótipos para regiões de maiores altitudes; desenvolvimento de cultivares/genótipos para cultivo consorciados, sistemas agroflorestais ou policultivo.

2. Mudanças climáticas na cafeicultura

Projeções globais indicam uma diminuição considerável na área adequada para a produção de café arábica em decorrência das alterações nos regimes pluviométricos e elevação da temperatura média (Ovalle-Rivera et al., 2015). Esse processo pode forçar o deslocamento da produção de café para regiões com condições climáticas mais favoráveis. No estado do Espírito Santo, esse fenômeno já vem sendo observado, com áreas tradicionalmente destinadas ao cultivo do cafeeiro arábica sendo gradativamente substituídas com a cafeicultura do conilon.

Muitas regiões produtoras de café estão cada vez mais enfrentando condições climáticas desfavoráveis ou extremas (Vinecky et al., 2017), tais como ondas severas de calor associadas com estiagens prolongadas, capazes de impactar a produção e a distribuição geográfica do café (Davis et al., 2006; Bunn et al., 2015; Vinecky et al., 2017). A América Central, por exemplo, é reconhecida como uma região crítica de vulnerabilidade e riscos às mudanças climáticas, com cenários prevendo diminuições drásticas na área adequada para o cultivo de café até 2050 (Läderach et al., 2017). Estima-se que 90% das áreas cafeeiras da Nicarágua deverão adequar seus cultivos para as

próximas décadas, sobretudo aquelas lavouras conduzidas em regiões de menores altitudes (Läderach et al., 2017).

Modelos matemáticos estimam que, na região sudeste do Brasil, haverá uma elevação progressiva da temperatura média do ar até 2050, atingindo um aumento de $1,7\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,3$ (Gomes et al., 2020). Consequentemente, cerca de 60% das áreas atualmente consideradas adequadas para a cafeicultura serão consideradas inadequadas (Gomes et al., 2020).

A conscientização sobre as mudanças nas condições ambientais deve ser objeto de interesse por pesquisadores, agricultores e tomadores de decisão sobre como essas mudanças já impactam a cafeicultura, para que estratégias possam ser desenvolvidas e adotadas. Estudos recentes demonstram que a pressão de pragas e doenças poderá se intensificar com o agravamento das mudanças climáticas (Harelimana et al., 2022). Um estudo realizado por Jaramillo et al. (2009) constatou que o aumento de 1 a 2 $^{\circ}\text{C}$ na temperatura média poderia acelerar o desenvolvimento da broca do café (*Hypothenemus hampei*). Aumento superior a 2 $^{\circ}\text{C}$ forçaria a broca a migrar para altitudes superiores, intensificando os danos provocados pela praga na cafeicultura de montanha. Outros estudos sugeriram que a elevação da temperatura média poderia dobrar ou até triplicar o número de gerações da broca durante apenas um ciclo produtivo do café (Jaramillo et al., 2011; Rice, 2018). Em contrapartida, inimigos naturais podem não se adaptar às mudanças climáticas e, desta forma, desfavorecer o controle biológico (Furlong e Zalucki, 2017).

3. Melhoramento genético para tolerância ao estresse hídrico e térmico

No contexto das mudanças climáticas, a ocorrência de secas intensas e atípicas é ponderada como uma das principais ameaças à produção cafeeira mundial (Martins et al., 2018; Semedo et al., 2018). O acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs) é visto como um dos efeitos nocivos mais

expressivos causados pelos estresses térmicos e hídricos. Por exemplo, a diminuição da abertura estomática ocasionada por esses estresses causa restrições fotossintéticas, acumulando energia em excesso e favorecendo a formação de EROs (DaMatta e Ramalho, 2006).

Com a ocorrência de aumentos concomitantes na concentração de CO₂ e temperatura, evidências recentes mostraram que genótipos de café (genótipos Icatu e IPR108 de *C. arabica* e genótipo 153 de *C. canephora*) conseguem tolerar temperaturas até 37 °C, devido a ajustes metabólicos e moleculares (Martins et al., 2016; Rodrigues et al., 2016). No entanto, essa possível tolerância ao estresse térmico está estreitamente dependente de uma adequada disponibilidade hídrica para o cafeeiro (DaMatta et al., 2018). Com isso, cabe ressaltar a possibilidade de mitigação do aumento da temperatura com a suplementação hídrica no cafeeiro, e a necessidade de estudos dos impactos da ocorrência simultânea de restrição hídrica e elevação da temperatura.

O melhoramento genético do cafeeiro conilon desempenha papel crucial nesse contexto, sobretudo no desenvolvimento de materiais genéticos com tolerância a esses estresses abióticos. Sabe-se que as plantas podem responder de forma diferenciada em relação ao nível de estresse (Mishra et al., 2016), o que torna ainda mais pertinente o conhecimento dos efeitos da sobreposição das tensões abióticas (*e.g.*, estresse térmico e hídrico), haja visto que a velocidade de resposta da planta em relação ao metabolismo celular e aclimação fotossintética pode atuar como fator-chave para o desenvolvimento vegetal em ambientes oscilantes (Nouri et al., 2015). Além disso, o melhoramento do cafeeiro deve levar em consideração a capacidade resiliente dos genótipos após a imposição dos estresses, sobretudo no contexto dos mecanismos fisiológicos específicos envolvidos na adaptação (Song et al., 2014).

Uma ferramenta importante para o avanço do melhoramento genético consiste no uso de marcadores moleculares relacionados à expressão de tolerância aos estresses. Evidências científicas destacam a utilidade da identificação marcadores relacionados a genes (*e.g.*, *CaMYB1*, *CaERF017*, *CaEDR2*, *CaNCED*, *CaAPX1*, *CaAPX5*, *CaGolS3*, *CaDHNI* e *CaPYL8a*) com potencial para identificação de genótipos com maior eficiência fotoquímica para condições de déficit hídrico ou correlacionados com outras características de tolerância a seca (Santos et al., 2021).

4. Melhoramento genético para o cultivo em altitude

Devido à intensificação das ondas de calor decorrentes das mudanças climáticas, há uma tendência crescente de migração do cultivo do café conilon para altitudes mais elevadas em busca de temperaturas mais amenas (Ferrão et al., 2024). Com a migração dessa espécie para altitudes maiores, é necessária a investigação de genótipos adaptados a esta nova condição ambiental, agregando alternativas para uma produção de café mais sustentável (Bunn et al., 2015; Colodetti et al., 2016).

Efeitos mitigadores às mudanças climáticas podem ser obtidos pela associação do cultivo em maiores altitudes, uso de irrigação e genótipos de conilon mais adaptados. Tal condição pode ser entendida como uma conjuntura de estratégias para viabilizar um melhor aproveitamento dos recursos genéticos e hídricos, contribuindo para a sustentabilidade da atividade. Pesquisas sobre esse tema são importantes para melhor compreender a tolerância ao estresse hídrico e quantificar os ganhos que podem ser obtidos pela associação dessas práticas agrícolas, bem como avaliar os efeitos a longo prazo na produtividade do café, buscando principalmente a adaptabilidade e a estabilidade dos genótipos para futuras plantações.

Evidências recentes demonstram que o desempenho de genótipos de cafeeiro conilon é expressivamente variável quando cultivados em maior

altitude, para aspectos vegetativos e reprodutivos. A elevada variabilidade genética intrínseca dessa espécie é capaz de justificar tal resultado. Notadamente alguns genótipos, pertencentes à cultivares clonais registradas e durante o terceiro ciclo produtivo, foram capazes de apresentar desempenho produtivo satisfatórios em altitude de transição (650 m), como é o caso dos genótipos 105, 106, 108 e 109 (cultivar “Diamante ES8112 – Incaper”), genótipo 205 (cultivar “Jequitibá ES8122 – Incaper”) e genótipos 302 e 306 (cultivar “Centenária ES8132 – Incaper”), com produtividades superiores a 80 sacas de 60 kg por hectare. Em contrapartida, outros genótipos não apresentaram um desempenho expressivo para a produção, como é o caso do 101, 102, 103, 107, 202, 204, 208 e 308, com produtividades inferiores a 45 sacas por hectare (Jordaim et al., 2025).

Ganhos com a seleção clonal também podem ser favorecidos em estudos sobre a variabilidade genética de genótipos de conilon em altitude. Evidências de um estudo revelam elevada magnitude da herdabilidade dos genótipos cultivados em 850 m de altitude, o que aumentou a precisão e, consequentemente, a seleção de seis genótipos nessa condição, sendo eles: NV2, NV8, P1, 3V, Verdim TA e A1. Esses materiais se destacaram em produtividade, adaptabilidade e estabilidade, com capacidade produtiva variando de 36,7 a 59,9 sacas por hectare (Martins et al., 2019).

Outro aspecto relevante consiste na capacidade de crescimento vegetativo dos genótipos em função da variação da altitude de cultivo (700 m e 140 m). Dados recentes envolvendo 112 genótipos revelaram que, no geral, a altitude foi capaz de estimular o crescimento inicial. Além disso, observou-se elevada variabilidade genética para diversos descritores do crescimento vegetativo, inclusive a possibilidade de formação de agrupamentos com diferentes genótipos em cada condição de altitude (Senra et al., 2023).

A qualidade sensorial e composição química do café conilon também pode ser favorecida. Trabalhos demonstraram notas sensoriais ultrapassando

80 pontos para amostras de café de alguns genótipos de conilon cultivados em 650 m de altitude. Além disso, os compostos voláteis 4-etnil-2-metoxifenol, 2-furil-metanol e furfural, bem como os atributos sensoriais sabor, sensação na boca e amargor/doçura, favoreceram o estudo da divergência genética entre os genótipos de conilon e estiveram relacionados com a qualidade da bebida (Machado et al., 2021).

Diante desse contexto, o melhoramento genético da espécie *C. canephora* para ambientes de maior altitude, atuando como medida mitigadora das mudanças climáticas e observando as alterações no zoneamento agroclimatológico, é fundamental para a sustentabilidade da cafeicultura, sobretudo a de base familiar. Com isso, uma das principais preocupações referentes ao cultivo do conilon em maiores altitudes, consiste na ocorrência de menores temperaturas, uma vez que alterações térmicas podem causar grandes impactos na produção dos cafeeiros (Jaramillo et al., 2009). Muitas dessas áreas mais elevadas estão zoneadas como marginais para o cultivo de conilon, tendo em vista a possibilidade de impedimentos térmicos por menores temperaturas (Taques e Dadalto, 2019), o que justifica a necessidade de ampliação dos estudos voltados para o desempenho e seleção de genótipos em tais condições.

5. Melhoramento genético para sistemas agroflorestais

A adoção de sistemas agroflorestais, consorciados ou policultivos, apresentam uma série de vantagens à cafeicultura além do potencial mitigador das mudanças climáticas. Abordagens na literatura sugerem que os sistemas de café sombreados e com múltiplas culturas são promissoras no manejo de pragas no contexto das mudanças do clima (Harelimana et al., 2022).

Os sistemas agroflorestais podem aumentar a ciclagem de nutrientes, a biodiversidade, o armazenamento de carbono e proporcionar um microclima mais ameno (Duarte et al., 2013; Nair, 1997). O microclima formado

apresenta uma menor temperatura média do ar e maior umidade do solo em comparação com a monocultura (Moreira et al., 2018). Pesquisas de campo na região serrana do sudeste do Brasil mostram que os sistemas agroflorestais podem reduzir as temperaturas máximas diárias em até 5 °C (Souza et al., 2012a, b).

O uso de sistemas agroflorestais pode mitigar os efeitos das mudanças climáticas (Lin, 2010), atenuando os efeitos da radiação solar, da velocidade do vento e da temperatura do ar (Pezzopane et al., 2010; Siles et al., 2010), levando à estabilização do microclima e aumento do aporte de carbono no solo (Gomes et al., 2016), bem como uma maior eficiência no uso da água (Lin, 2010). Modelos matemáticos estimam que a adoção de sistemas agroflorestais pode preservar até 75% das áreas aptas para a cafeicultura, que se tornariam inaptas até 2050 pelos efeitos das mudanças climáticas (Gomes et al., 2020).

Em virtude dos desafios condicionados pelas alterações do clima, a adoção de sistemas agroflorestais é hoje considerada uma solução agroecologicamente interessante para culturas perenes sensíveis às mudanças climáticas (Koutouleas et al., 2022). Contudo é necessário escolher adequadamente quais genótipos são passíveis de cultivo nesses sistemas. Nesse contexto, é fundamental o desenvolvimento de trabalhos direcionados ao melhoramento genético do *C. canephora* para cultivos agroflorestais, de modo a promover a seleção e agrupamento dos materiais mais responsivos e adaptados a cada condição.

Estudos recentes demonstraram que, ao buscar selecionar genótipos de café conilon promissores em sistemas agroflorestal (Eucalipto + banana + café) e consórcio (laranja + café), foi possível selecionar 20 materiais para cada um dos dois sistemas de cultivo, partindo de uma população de 90 genótipos. Destes 20 materiais, os clones 16, 17, 35, 43, 48, 61, 64, 68 e o 109 (genótipo controle pertencente a cultivar clonal Diamante ES8112) foram os

mais promissores para ambos os sistemas. Com isso, constatou-se elevada variabilidade genética entre os materiais e a possibilidade de exploração dessa variabilidade para objetivos específicos, como é o caso dos consórcios e sistemas agroflorestais (Senra et al., 2024).

Outro estudo bastante relevante estabeleceu um comparativo entre monocultivo do café e sistema agroflorestal com seringueira, durante quatro safras produtivas consecutivas e com genótipos de *C. canephora* e *C. arabica*. Ao estudar o potencial genético dos materiais com base em aspectos vegetativos, produtivos e fitossanitários, foi demonstrada a possibilidade de ganhos indiretos de seleção para as características em estudo. Os genótipos de conilon A1 e 5V apresentaram estabilidade, revelando notável capacidade de adaptação, independentemente do ambiente. Adicionalmente, os genótipos A1, 5V, 308 e LB1 destacaram-se como potenciais e promissores para o cultivo em sistemas agroflorestais (Senra et al., 2025).

Além da importância em se buscar novos genótipos para cultivos consorciados e agroflorestas, também é extremamente relevante o estudo do comportamento de genótipos melhorados em tais condições. Evidências recentes demonstram diferenças significativas em características vegetativas, reprodutivas e nutricionais entre oito genótipos de *C. canephora* consorciados com coqueiro-anão. A variabilidade fenotípica e genética que foi expressa, parece ser suficiente para permitir a seleção de genótipos mais adequados para o consórcio. Os genótipos 83, 48, 02 e 153 destacaram-se no consórcio com o coqueiro-anão, visto que a seleção destes materiais foi capaz de promover ganhos em diversas das características analisadas (Christo et al., 2018; Rodrigues et al., 2025).

Diante do exposto, notadamente se observa uma expressiva variabilidade genética na espécie *C. canephora*, o que conduz para a possibilidade de desenvolvimento de genótipos e/ou cultivares adaptados e responsivos para os cultivos consorciados e agroflorestais. Nesse contexto, o

melhoramento genético é uma ferramenta crucial para contribuir como estratégia de mitigação das mudanças climáticas, como viabilizador de sistemas de cultivo e colaborador para a sustentabilidade da atividade cafeeira.

6. Considerações finais

O processo de mudanças climáticas está rapidamente modificando a produção de café no mundo, e o cafeeiro conilon não é uma exceção. À medida que novas áreas se tornam viáveis para o cultivo do conilon, em função das restrições enfrentadas pelo cafeeiro arábica, outras deixam de ser adequadas devido ao aumento do estresse hídrico e térmico. Dentre as soluções para a proteção do conilon, destacam-se o cultivo em regiões de maior altitude e em sistemas agroflorestais ou consorciados. Essas estratégias de mitigação abrem novos horizontes para os programas de melhoramento genético no mundo.

O melhoramento do conilon se depara com ambientes ainda pouco explorados, para os quais não existem clones amplamente validados. Ressalta-se que, na cafeicultura de montanha, há uma grande diversidade de microclimas, que variam de acordo com a orientação do relevo, enquanto os sistemas agroflorestais são dinâmicos e em constante transformação, moldados pelas espécies selecionadas pelos agricultores.

O desafio atual dos pesquisadores consiste em desenvolver e validar genótipos capazes de enfrentar as mudanças climáticas, conciliando alta produtividade, boa qualidade de bebida e menor suscetibilidade a pragas e doenças. O fortalecimento da cafeicultura de conilon em regiões de montanha e em sistemas arborizados representa uma alternativa estratégica para a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, a promoção da segurança alimentar e a proteção da agricultura familiar.

Referências

- Abrahams, D. (2020). Conflict in abundance and peacebuilding in scarcity: Challenges and opportunities in addressing climate change and conflict. *World Development*, 132, 104998. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.104998>. Acesso em: 29 set 2025.
- Bunn, C.; Läderach, P.; Ovalle-Rivera, O.; Kirschke, D. A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. *Climatic Change*, v.129, p.89–101, 2015. doi: 10.1007/s10584-014-1306-x.
- Christo, B.F.; Rodrigues, W.N.; Verdin Filho, A.C.; Colodetti, T.V.; Olivas, D.B.L.; Martins, L.D.; Oliveira, F.L.; Tomaz, M.A. Morpho-agronomic characterization of genotypes of Conilon coffee intercropped with dwarf coconut palms. *AUSTRALIAN JOURNAL OF CROP SCIENCE*, v.12, p. 1479-1485, 2018.
- Colodetti, T.V.; Brinate, S.V.B.; Erlacher, W.A.; Starling, L.C.T.; Tomaz, M.A. Aspectos gerais do cultivo de *Coffea arabica* e *Coffea canephora* em altitudes marginais. In: Ferreira, A.; Lopes, J.C.; Ferreira, M.F.S.; Soares, T.C.B. **Tópicos Especiais em Produção Vegetal VI**. 1. ed. Alegre-ES: CCAUFES, 2016. p. 342-362.
- DaMatta, F.M.; Avila, R.T.; Cardoso, A.A.; Martins, S.C.V.; Ramalho, J.C. Physiological and Agronomic Performance of the Coffee Crop in the Context of Climate Change and Global Warming: A review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v.66, p.5264-5274, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.7b04537>. Acesso em: 29 set 2025.
- DaMatta, F.M.; Ramalho, J.C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, v.18, p.55-81, 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1677-04202006000100006>. Acesso em: 29 set 2025.
- Davis, A.P.; Govaerts, R.; Bridson, D.M.; Stoffelen, P. An annotated taxonomic conspectus of the genus *Coffea* (Rubiaceae). *Botanical J. Linnean Soc.* 152, 465–512. 2006. doi: 10.1111/j.1095-8339.2006.00584.x
- Duarte, E.M.G.; Cardoso, I.M.; Stijnen, T.; Mendonça, M.A.F.C.; Coelho, M.S.; Cantarutti, R.B.; Kuyper, T.W.; Villani, E.M.A.; Mendonça, E.S. Decomposition and nutrient release in leaves of Atlantic Rainforest tree species used in agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, v.87, p.835-847, 2013. Acesso em: <https://doi.org/10.1007/s10457-013-9600-6>. Acesso: 29 set. 2025.
- Ferrão, M.A.G.; Riva-Souza, E.M.; Azevedo, C.; Volpi, P.S.; Fonseca, A.F.A.; Ferrão, R.G.; Montagnon, C.; Ferrão, L.F.V. Robust and Smart: Inference on Phenotypic Plasticity of *Coffea canephora* Reveals Adaptation to Alternative Environments. *Crop Science*, v.64, p.csc2.21298, 2024.
- Furlong, M.J.; Zalucki, M.P. Climate change and biological control: the consequences of increasing temperatures on host–parasitoid interactions. *Current Opinion in Insect Science*, v.20, p.39-44, 2017.
- Gomes, L.C.; Bianchi, F.J.J.A.; Cardoso I.M.; Fernandes, R.B.A.; Fernandes Filho, E.I.; Schulte, R.P.O. Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production: A spatially explicit assessment in Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v.294, p. 106858, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106858/>. Acesso: 29 set. 2025.
- Gomes, L.C.; Cardoso, I.M.; Mendonça, E.S.; Fernandes, R.B.A.; Lopes, V.S.; Oliveira, T.S. Trees modify the dynamics of soil CO₂ efflux in coffee agroforestry systems. *Agricultural*

- and **Forest Meteorology**, v.224, p. 30-39, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.05.001>. Acesso: 29 set. 2025.
- Harelimana, A.; Rukazambuga, D.; Hance, T. Pests and diseases regulation in coffee agroecosystems by management systems and resistance in changing climate conditions: a review. **Journal of Plant Diseases and Protection**, v.129, p. 1041-1052, 2022. doi:10.1007/s41348-022-00628-1.
- IPCC. Climate Change 2021: **The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L. *et al.*(Eds.). Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport>. Acesso em: 29 set. 2025.
- Jaramillo, J.C.; Adenirir, K.; Charles, J.; Vega, A.F.; Poehling, H.M.; Borgemeister, C. Thermal tolerance of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei*: predictions of climate change impact on a tropical insect pest. **PLOS ONE**, v.4, n.8, p. 1-11, 2009.
- Jaramillo, J.; MUCHUGU, E.; VEGA, F.E.; DAVIS, A.P.; BORGEMEISTER, C. Some like it hot: the influence and implications of Climate Change on coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) and coffee production in East Africa. **PLOS ONE**, v.6, n.9, p.e24528, 2011.
- Jordaim, R.B.; Colodetti, T.V.; Rodrigues, W.N.; Salles, R.A.; Amaral, J.F.T.; Maciel, L.S.; Partelli, F.L.; Ramalho, J.D.C.; Tomaz, M.A. Genotypic Performance of *Coffea canephora* at Transitional Altitudes for Climate-Resilient Coffee Cultivation. **Horticulturae**, v.11, p.1-14, 2025.
- Koutouleas, A.; Sarzynski, T.; Bordeaux, M.; Bosselmann, A.S.; Campa, C.; Etienne, H.; Turreira-García, N.; Rigal, C.; Vaast, P.; Ramalho, J.C.; Marraccini, P.; Raebild, A. Shaded-Coffee: A Nature-Based Strategy for Coffee Production Under Climate Change? A Review. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v.6, p.877476, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.877476>. Acesso em: 25 set. 2025.
- Läderach, P.; Ramirez-Villegas, J.; Navarro-Racines, C.; Zelaya, C.; Martinez-Valle, A.; Jarvis, A. Climate change adaptation of coffee production in space and time. **Climatic Change**, v.141, p.47-62, 2017. doi: 10.1007/s10584-016-1788-9
- Lin, B.L. The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems. **Agriculture For Meteorology**, v.150, p.510–518, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.11.010>. Acesso em: 25 set. 2025.
- Machado, J.L.; Tomaz, M.A.; Luz, J.M.R.; Osório, V.M.; Costa, A.V.; Colodetti, T.V.; Debona, D.G.; Pereira, L.L. Evaluation of genetic divergence of coffee genotypes using the volatile compounds and sensory attributes profile. **Journal of Food Science**, v. 87, p. 1-13, 2021.
- Martins, L.D.; Eugenio, F.C.; Rodrigues, W.N.; Brinati, S.V.B.; Colodetti, T.V.; Christo, B.F.; Olivas, D.B.L.; Partelli, F.L.; Amaral, J.F.T.; Tomaz, M.A.; Ramalho, J.D.C.; Santos, A.R. Adaptation to Long-Term Rainfall Variability for Robusta Coffee Cultivation in Brazilian Southeast. **American Journal of Climate Change**, v.7, p.487-504, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/ajcc.2018.74030>. Acesso em: 29 set. 2025.

- Martins, M.Q.; Partelli, F.L.; Adésio, F.; Ramalho, J.D.C. Adaptability and stability of *Coffea canephora* genotypes cultivated at high altitude and subjected to low temperature during the winter. **Scientia Horticulturae**, v.252, p.238-242, 2019.
- Martins, M.Q.; Rodrigues, W.P.; Fortunato, A.S.; Leitão, A.E.; Rodrigues, A.P.; Pais, I.P.; Martins, L.D.; Silva, M.J.; Reboredo, F.H.; Partelli, F.L.; Camprostrini, E.; Tomaz, M.A.; Scotti-Campos, P.; Ribeiro-Barros, A.I.; Lidon, F.J.C.; DaMatta, F.M.; Ramalho, J.C. Protective Response Mechanisms to Heat Stress in Interaction with High [CO₂] Conditions in *Coffea* spp. *Frontiers in Plant Science*, v. 29, p. 947-964, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00947>.
- Mishra, K.B.; Mishra, A.; Novotná, K.; Rapantová, B.; Hodaňová, P.; Urban, O.; Klem, K. Chlorophyll a fluorescence, under half of the adaptive growth irradiance, for high-throughput sensing of leaf-water deficit in *Arabidopsis thaliana* accessions. **Plant Methods**, v.12, n.46, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1186/s13007-016-0145-3>. Acesso em: 29 set. 2025.
- Moreira, S.L.S.; Pires, C.V.; Marcatti, G.E.; Santos, R.H.S.; Imbuzeiro, H.M.A.; Fernandes, R.B.A. Intercropping of coffee with the palm tree, macauba, can mitigate climate change effects. **Agric. For. Meteorol.**, v.256, n.257, p.379–390, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.03.026>. Acesso em: 29 set. 2025.
- Nair, P.K.R. Directions in tropical agroforestry research: past, present, and future. **Agroforestry Systems**, v.38, p.223–245, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1005943729654>. Acesso em: 20 set 2025.
- Nouri, M.Z.; Moumeni, A.; Komatsu, S. Abiotic Stresses: Insight into Gene Regulation and Protein Expression in Photosynthetic Pathways of Plants. **International Journal of Molecular Science**, v.16, n.9, p.20392-416, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/ijms160920392>. Acesso em 29 set 2025.
- Ovalle-Rivera, O.; Läderach, P.; Bunn, C.; Obersteiner, M.; Schroth, G. Projected shifts in *Coffea arabica* suitability among major global producing regions due to climate change. **PLOS One**, v.10, p.1–13, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124155>. Acesso em: 29 set 2025.
- Pezzopane, J.R.M.; Marsetti, M.M.S.; Souza, J.M.; et al. Condições microclimáticas em cultivo de café conilon a pleno sol e arborizado com nogueira macadâmia. **Ciência Rural**, v.40, p.1257–1263, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010005000098>. Acesso em: 29 set. 2025.
- Rice, R.A. Coffee in the crosshairs of climate change: agroforestry as abatis. **Agroecol Sustain Food Syst**, v.42, p.1058–1076, 2018.
- Rodrigues, W.N.; Christo, B.F.; Tomaz, M.A.; Colodetti, T.V.; Verdin Filho, A.C.; Senra, J.F.B.; Comério, M.; Volpi, P.S. Intercropping with dwarf coconut: vegetative, reproductive and nutritional traits of *Coffea canephora* genotypes recommended to monoculture. **Caderno pedagógico (Lajeado. Online)**, v.22, p.e13835, 2025.
- Santos, C.A.C.; Neale, C.M.U.; Mekonnen, M.M.; Goncalves, I.Z.; Oliveira, G.; Ruiz-Alvarez, O.; Safa, B.; Rowe, C.M. Trends of extreme air temperature and precipitation and their impact on corn and soybean yields in Nebraska, USA. **Theor. Appl. Climatol.**, v.147, p.1379–1399, 2022.
- Santos, M.O.; Coelho, L.S.; Carvalho, G.R.; Botelho, C.E.; Torres, L.F.; Vilela, D.J.M.; Andrade, A.C.; Silva, V.A. Photochemical efficiency correlated with candidate gene

- expression promote coffee drought tolerance. **Scientific Reports**, v.11, p.e7436, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86689-y>. Acesso em: 29 set. 2025.
- Semedo, J.N.; Rodrigues, W.P.; Dubberstein, D.; Martins, M.Q.; Martins, L.D.; Pais, I.P.; Rodrigues, A.P.; Leitão, A.E.; Partelli, F.L.; Campostrini, E.; Tomaz, M.A.; reboredo, F.H.; Scotti-Campos, P.; Ribeiro-Barros, A.I.; Lidon, F.J.C.; DaMatta, F.M.; Ramalho, J.C. Coffee Responses to Drought, Warning and High [CO₂] in a Context of Future Climate Change Scenarios. In: Alves, F.; Leal Filho, W.; Azeiteiro, U. (Edi). **Climate Change Management. Theory and Practice of Climate Adaptation**. Springer, Cap. 26, p. 465-477. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72874-2>. Acesso em: 29 set 2025.
- Senra, J.F.B.; da Silva, J.A.; Esposti, M.D.D. Promising conilon coffee trees clones for agroforestry and intercropping systems. **Agroforest Syst**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10457-024-00988-7>. Acesso em: 29 set. 2025.
- Senra, J.F.B.; Comerio, M.; Oliveira, R.G.; Silva, V.A.C.; Gomes, W.M.; Ferrão, M. A.G.; Verdin Filho, A.C.; Volpi, P. S.; Ferrão, R. G.; Almeida da Fonseca, A. F.; Tomaz, M. A. Avaliação do potencial genético de cafeeiros em sistemas agroflorestais com seringueira. **Bragantia**, v. 84, e20240182, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20240182>. Acesso em: 29 set. 2025.
- Senra, J.F.B.; Silva, J.A.; Ferreira, A.; Esposti, M.D.D.; Ferrão, M.A.G.; Fassarella, K.M.; Silva, U.R.; Milheiros, I.S.; Silva, F.G. Initial performance and genetic diversity of coffee trees cultivated under contrasting altitude conditions. **Scientia Agricola**, v.80, p.e20220163. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2022-0163>. Acesso em: 29 set. 2025.
- Siles, P.; Harmand, J.; Vaast, P. Effects of Inga densiflora on the microclimate of coffee (*Coffea arabica* L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. **Agroforestry Systems**, v.78, p.269–286. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9241-yn>. Acesso em: 29 set. 2025.
- Song, Y.; Chen, Q.; Ci, D.; Shao, X.; Zhang, D. Effects of high temperature on photosynthesis and related gene expression in poplar. **BMC Plant Biology**, v. 14, p. 111, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1186/1471-2229-14-111>. Acesso em: 29 set. 2025.
- Souza, H. N.; Goede, R. G. M.; Brussaard, L.; Cardoso, I. M.; Duarte, E. M. G.; Fernandes, R. B. L. C.; Pulleman, M. M. Protective shade, tree diversity and soil properties in coffee agroforestry systems in the Atlantic Rainforest biome. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.146, p.179–196, 2012a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.11.007>. Acesso em: 29 set. 2025.
- Souza, H.N.; Graaff, J.; Pulleman, M.M. Strategies and economics of farming systems with coffee in the Atlantic Rainforest Biome. **Agroforestry Systems**, v.84, p.227–242, 2012b. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9452-x>. Acesso em: 29 set. 2025.
- Taques, R.C.; Dadalto, G.G. Agroclimatic Zoning for Conilon Coffee Culture in the State of Espírito Santo. In: Ferrão, R.G.; Fonseca, A.F.A.; Ferrão, M.A.G.; Muner, L.H. (Eds.). **Conilon Coffee**. Vitória: Incaper, 2019. p. 70–83. Incaper.
- Vinecky, F.; Davrieux, F.; Mera, A.C.; Alves, G.S.C.; Lavagnini, G.; Leroy, T.; et al. Controlled irrigation and nitrogen, phosphorous and potassium fertilization affect the biochemical composition and quality of Arabica coffee beans. **J. Agric. Sci.**, 155, 902–918, 2017. doi: 10.1017/S0021859616000098.

CAPÍTULO 10

Desafios ecofisiológicos dos cafeeiros robustas amazônicos cultivados em terras Capixabas

**Jairo Rafael Machado Dias, Paulo Eduardo Menezes-Silva,
Fabiano Guimarães Silva, Fernanda dos Santos Farnese,
Vando Miossi Rondelli, Angela Maria dos Santos Pessoa,
Idelfonso Leandro Bezerra, Fábio Luiz Partelli**

1. Introdução

No Espírito Santo (ES) predomina o cultivo de *Coffea canephora* var. Conilon (Venâncio et al., 2020). Já em Rondônia, cultiva-se híbridos de seleção natural, oriundos do cruzamento de genótipos do Grupo SG1 ou “Conilon” com grupo genético desconhecido, porém com características de “Robusta” (Garavito et al., 2016), introduzidos no período da colonização do estado, na década de 1980 (Dias et al., 2024).

Os híbridos de Rondônia possuem características fenotípicas distintas do “Conilon capixaba”. E, por apresentarem atributos encontrados exclusivamente no grupo “Robusta” (SG2) (Garavito et al., 2016), possuírem indicação geográfica, tipo denominação de origem (IG Matas de Rondônia) e serem cultivados na Amazônia são conhecidos como “Robustas amazônicas” pelo mundo e “Robustas de Rondônia” no Brasil, principalmente no ES (Dias et al., 2024).

O ES produz 70% do café conilon do Brasil, com 13,1 milhões de sacas cultivados em 258 mil hectares (CONAB, 2025), entretanto, a cafeicultura capixaba tem passado por constantes ameaças nos últimos anos, colocando em risco a sua soberania. E, destacam-se:

i) A “seca histórica” entre o segundo semestre de 2014 até o início de 2016, que comprometeu 25% da produção capixaba na safra 2014/2015 [safra anterior (2013/2014) $\pm$ 10 milhões de sacas] e 50% do que seria esperado nas 2015/2016 e 2016/2017. De modo, que a produção cafeeira capixaba só voltou a superar 10 milhões de sacas na safra 2018/2019 (CONAB, 2025), demonstrando dependência às condições irrigadas e sensibilidade ao estresse hídrico.

ii) E, mais recentemente problemas de ordem fitossanitária tem “aterrorizado” a cafeicultura capixaba, com destaque para o “Cancro dos ramos do cafeeiro”, que vem “dizimando” parte dos genótipos mais cultivados no estado (LB1, K61, MP3, P1 e 12V), causando redução drástica do seu parque cafeeiro (Lima et al., 2023).

Neste contexto, na busca constante por genótipos que incrementam a produtividade e ao mesmo tempo sejam tolerantes e/ou resistentes ao “Cancro dos ramos do cafeeiro”, cafeicultores e viveiristas capixabas, por iniciativa própria tem encontrado na cafeicultura rondoniense grande diversidade genética (DG).

E, Rondônia têm exportado material genético de qualidade, a partir da comercialização de mudas clonais e, principalmente propágulos vegetativos (estacas ortotrópicas). Destaca-se que a DG é fundamental para renovação do parque cafeeiro capixaba, visto que compreender a composição genética de diferentes grupos varietais e as implicações da hibridização, possibilita aproveitar o poder da diversidade para desenvolvimento de genótipos superiores (Silva et al., 2024).

Adicionalmente, alerta-se que as mudas e/ ou estacas vegetativas exportadas para o Espírito Santo, podem introduzir novas pragas e/ou doenças que já estão estabelecidas em Rondônia. A exemplo, da nova espécie de cochonilha-da-roseta, *Ferrisia dasyliirii* (Cockerell, 1896) (Hemiptera: Pseudococcidae), que vem atacando severamente cafezais rondonienses, superando *Planococcus minor* (Rondelli et al., 2018).

Neste cenário, embora desafiador, a melhoria da sustentabilidade da cafeicultura capixaba envolve a renovação do seu parque produtivo, com a inclusão genótipos mais produtivos com tolerância e/ou resistência aos estresses abióticos e bióticos que limitam a sua produtividade. Como vem sendo realizado com a introdução de material genético rondoniense.

Entretanto, torna-se fundamental para o sucesso da cadeia produtiva do café em terras capixabas, pesquisas que incorporem diversos germoplasmas com potencial agrônomo distintos, bem como o conhecimento ecofisiológico deste material, principalmente. Pois, estudos recentes têm revelado que o alto potencial produtivo dos cafeeiros robustas amazônicos está associado a elevada vulnerabilidade à falha hidráulica, em condições de estresse hídrico (Max et al., 2022a).

Embora os cafeeiros robustas amazônicos apresentem fotossíntese líquida elevada, essa vantagem fisiológica está associada a baixa eficiência no uso da água, sobretudo durante a estação seca. Isso implica que ganhos de produtividade podem ser compensados por maior risco de estresse hídrico (Max et al., 2022b), especialmente em ambientes mais “secos”, como é o caso do Espírito Santo em relação a Rondônia.

E, essa característica reforça a necessidade de cautela com a introdução dos cafeeiros robustas amazônicos em regiões onde ocorre restrição hídrica. De modo, que o conhecimento ecofisiológico envolve entender o nível de sensibilidade dessas plantas às condições de estresse

hídrico, o que se torna imprescindível para definição das melhores estratégias do seu manejo em “terras capixabas”.

2. Ecofisiologia de cafeeiros vs. disponibilidade hídrica

Comparado a outras espécies perenes tropicais, particularmente o cafeeiro possui baixa assimilação de carbono (A ; tipicamente variando de 4 a 11 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). No entanto, sob alta concentração de gás carbônico, esses valores de assimilação de carbono podem aumentar substancialmente (por exemplo, de 30 a 50 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), sugerindo que a baixa capacidade fotossintética do cafeeiro está associada às restrições difusivas (DaMatta et al., 2018).

Diferenças na capacidade difusiva no cafeeiro estão amplamente acopladas ao seu potencial de perda de água para atmosfera, através da transpiração, o que requer um sistema de transporte hídrico eficiente (Menezes-Silva et al., 2015).

Em nível foliar, a alta condutância hidráulica (K_{leaf}) para maior fluxo de água pode ocorrer pela redução da distância entre as células do mesófilo e os estômatos (McAdam et al., 2017), entretanto envolve investimento coordenado pela planta em grande número de células-guarda estomáticas, entretanto de pequeno calibre, o que resulta em maior condutância estomática e altas taxas fotossintéticas (Brodribb et al., 2017).

Apesar do potencial da seleção baseada na condutância hidráulica para reduzir limitações difusivas e assim melhorar a produtividade das plantas, pouco se sabe sobre a variabilidade nas propriedades hidráulicas para os cafeeiros robustas amazônicos (DaMatta et al., 2019).

Estudos em cafeeiros arábica e conilon revelaram estreita correlação entre a capacidade de transporte de água e assimilação de carbono, o que pressupõe sensibilidade dessas espécies ao estresse hídrico (Menezes-Silva et al., 2015; DaMatta et al., 2018;)

De fato, perdas de produção expressiva do cafeeiro associadas a episódios de seca já foram consecutivamente relatados em várias regiões do Brasil. Entretanto, a maior temperatura nas regiões de baixa altitude, potencializa o déficit de pressão de vapor (DPV), que passa ser um novo desafio nas principais regiões produtoras de conilon e/ou robustas do Brasil, a exemplo do cultivo no Espírito Santo, Rondônia e Bahia.

O DPV atmosférico se constitui em um tipo de estresse recorrente, que indicam que a “seca atmosférica” pode ter efeitos ainda mais pronunciados na produção do cafeeiro (Lobell et al., 2014). De modo que, mesmo em condições irrigadas, ocorre alto DPV e, conseqüentemente alterações significativas na fotossíntese do cafeeiro conilon, porém genótipos com alta condutividade hidráulica são menos afetados (Machado Filho et al., 2021). Tal fato, representa um grande desafio para consolidação dos cafeeiros robustas de Rondônia, em território capixaba.

3. Evolução hidráulica de cafeeiros conilon e/ou robusta: potencial e limitações em contextos de estresse hídrico

Eventos de desequilíbrio climático são cada vez mais frequentes no mundo, especialmente no Brasil. E, esse cenário está projetado para ser mais intenso nas próximas décadas, à medida que a frequência e/ou intensidade da seca estão previstas para quase todas as regiões produtoras de café do Brasil (IPCC, 2023).

Especificamente nas regiões produtoras de café conilon e/ou robusta do Brasil, modelos climáticos preveem aumento significativo na temperatura atmosférica, com conseqüentes reduções na pluviosidade, o que provavelmente resultará em mais perdas na produtividade (Gomes et al., 2020).

O forte impacto da seca no crescimento e na produção cafeeira está diretamente relacionado a prejuízos na rede de transporte de água dessas plantas (DaMatta et al., 2018). À medida que o solo seca, a tensão da água

dentro dos vasos do xilema se intensifica, podendo levar a ruptura da coluna de água que interconecta o cafeeiro, desde a raiz até as folhas. E, consequentemente levando a entrada de ar nesses vasos, fenômeno conhecido como cavitação (Brodribb et al., 2017).

As bolhas de ar geradas, a partir de eventos de cavitação podem-se expandir rapidamente, criando grandes embolias dentro dos vasos do xilema que podem se espalhar para vasos vizinhos, através de membranas de poros, resultando em perda catastrófica no transporte de água, através do corpo da planta, culminando em falha hidráulica (FH) e, consequente mortalidade da planta (McDowell et al., 2022).

Para proteger a integridade do sistema vascular, o cafeeiro reduz sua condutância estomática na fase inicial da seca, evitando sua transpiração excessiva (Martin-StPaul et al., 2017). Essa estratégia minimiza a depleção de água no solo e na planta, atrasando o estresse hídrico às custas da redução fotossintética, o que compromete a produção de carboidratos e consequente queda na produtividade.

O fechamento estomático protetor (FEp), prevenindo a FH foi observado em múltiplos estudos que mostram que a embolia do xilema geralmente ocorre após o FE completo, tipicamente após murchamento das folhas (Creek et al., 2020). O FE para menor vulnerabilidade à embolia ocorre com a redução do potencial hídrico (Ψ_w), limitado à 50% ($K_{leaf-P50}$) e representa estratégia fundamental para garantir a sobrevivência em condições de seca, uma vez que determina a margem de segurança hidráulica (MSH) (Martin-StPaul et al., 2017).

As folhas do cafeeiro arábica possuem resistência moderada ao embolismo e, em condições severas de seca, operam em MSH negativa (Mauri et al., 2020). E, embora a regulação da condutância estomática ocorra rapidamente após redução na disponibilidade de água, o FE completo ocorre

próximo ou abaixo da MSH, tornando-se as folhas altamente vulneráveis à mortalidade induzida por seca (Martins et al., 2019).

Embora a MSH possa explicar o alto nível de desfolha em cafeeiros não irrigados, a falta de informações sobre a variação de $K_{\text{leaf-P50}}$ e o ponto de FE nos cafeeiros robustas amazônicos, aumentam as incertezas sobre quão vulnerável estará a produção cafeeira capixaba, frente às mudanças climáticas.

Um desafio adicional para atender à crescente demanda por café em um cenário de escassez hídrica, envolve a possibilidade dos cafeeiros robustas de Rondônia terem sido selecionados, exclusivamente em condições irrigadas, sendo conseqüentemente mais vulneráveis ao estresse hídrico.

Estudos com cafeeiros já relataram MSH negativa, sugerindo que genótipos com maior capacidade de transporte de água são mais propensos as disfunções hidráulicas (Scoffoni e Sack, 2017). No cafeeiro conilon, genótipos sensíveis à seca também já foram relatados como menos responsivos a redução do Ψ_w e, conseqüentemente mais vulneráveis a FH (Mauri et al., 2020).

Além da MSH reduzida, a seleção genética em Rondônia, sempre priorizando genótipos mais produtivos pode ter contribuído para obtenção de plantas com baixa eficiência no uso da água, possuindo elevada taxa transpiratória, que pode ser explicado por perdas de água até mesmo após o FE completo (Martin-StPaul et al., 2017). E, essa possível perda residual de água das folhas para atmosfera ($g_{\text{leaf-res}}$) pode tornar os cafeeiros robustas amazônicos mais vulneráveis a FH (Duursma et al., 2019).

Variações na $g_{\text{leaf-res}}$ normalmente são atribuídas aos ajustes morfoanatômicos nas folhas e estão associadas às estratégias de crescimento contrastantes. Por exemplo, alto $g_{\text{leaf-res}}$ está associado ao investimento da planta em incremento estomático (densidade de estômatos) para melhorar a difusão do gás carbônico. E, possivelmente variações na $g_{\text{leaf-res}}$ estão

associadas às compensações entre a assimilação de carbono e a perda de água (Machado et al., 2021).

4. Robustas amazônicas: *revolução na cafeicultura rondoniense*

Os cafeeiros robustas amazônicos têm revolucionado a cadeia produtiva do café em Rondônia, baseando-se no cultivo de genótipos clonais superiores, selecionados pelos próprios cafeicultores (Dias et al., 2024). Essa seleção tem contribuído para manutenção do estado como principal produtor da região amazônica, além de estar entre os principais produtores de café robusta e/ou conilon do Brasil (CONAB, 2025).

No último quinquênio, Rondônia produziu em média dois milhões de sacas anuais, mesmo com redução de 70% do seu parque cafeeiro (CONAB, 2025). Isso só foi possível devido ao incremento da produtividade nas lavouras, saindo de 15 sacas ha^{-1} para mais de 54 sacas ha^{-1} (Figura 1).

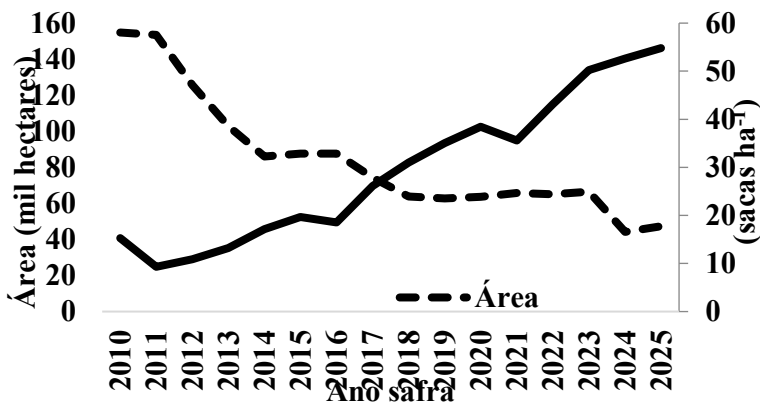


Figura 1. Área cultivada e produtividade do parque cafeeiro rondoniense no quinquênio 2010-2025. Fonte: CONAB (2025)

Dentre os genótipos selecionados responsáveis por essa revolução produtiva, destacam-se aqueles com potencial de alta produtividade (≥ 120 sacas ha^{-1} : 08, 25, LB010 e R22), moderada (80-120 sacas ha^{-1} : BG180, LB15,

AS2, 06, N13 e BRS3137) e baixa (≤ 80 sacas ha^{-1} : BRS2357, BRS3220 e BRS3193) (Max et al., 2022a).

No processo de seleção desses materiais genéticos superiores, oriundos de hibridações naturais, foram utilizados descritores voltados principalmente para os aspectos produtivos, como por exemplo o volume de frutos e rendimento de beneficiamento sob condições irrigadas, selecionando-se aqueles genótipos mais produtivos, sem considerar seu cultivo em condições de limitação hídrica, excetuando-se aos genótipos com código de iniciais BRS e final 20, 37, 57 e 93 (Figura 2).

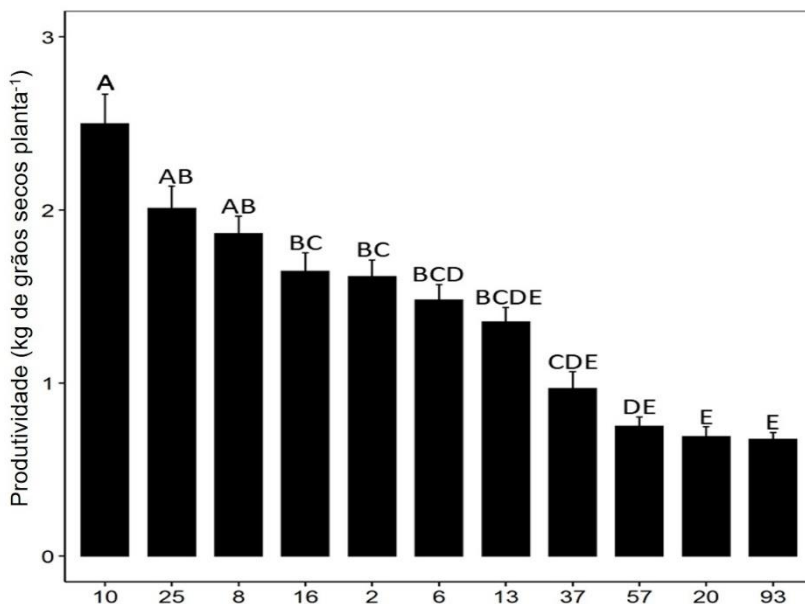


Figura 2. Diferenças na produtividade de robustas amazônicas entre 11 genótipos de *Coffea canephora* cultivados na Amazônia Ocidental. Fonte: Adaptado de Max et al. (2022a)

Além disso, estudos comparativos mostraram que os robustas amazônicos ao priorizarem altas taxas fotossintéticas e produtivas, tendem a

apresentar menor eficiência intrínseca no uso da água e maior propensão à cavitação (Max et al., 2022a; Max et al., 2022b). Portanto, a sustentabilidade do seu cultivo em terras capixabas dependerá não apenas da seleção de genótipos promissores, mas também da adoção de práticas de manejo adaptativas, como irrigação suplementar e sombreamento estratégico. De fato, informações ecofisiológicas revelam que os genótipos de robusta amazônica podem operar próximos ou abaixo da MSH, tornando-os particularmente sensíveis a eventos de seca prolongada (Max et al., 2022a).

5. Robustas amazônicas: desafios fisiológicos vs. alto potencial produtivo

A correlação positiva entre o incremento fotossintético e os melhores genótipos explica o alto potencial produtivo dos robustas amazônicos selecionado pelos próprios produtores (Figura 3a), com valores de fotossíntese líquida (A) sempre muito acima da faixa tida como normal para cafeeiros (A : 4-11 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, DaMatta et al., 2018), mesmo para cafeeiros cultivados na região amazônica (A : 8,2-10,7 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, Bravin et al., 2020).

Entretanto, sua alta taxa fotossintética está intimamente ligada a maior condutância estomática (Figura 3b). O que revela que além de ter baixa eficiência intrínseca ($E_i\text{UA} = 0,045 \mu\text{mol CO}_2 \text{mmol}^{-1} g_s$) e no uso da água ($E\text{UA} = 2,08 \mu\text{mol CO}_2 \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$), nesses genótipos quanto maior o incremento de carboidratos nos frutos, proporcionalmente ainda menores serão a $E_i\text{UA}$ ($0,031 \mu\text{mol CO}_2 \text{mmol}^{-1} g_s$) e $E\text{UA}$ ($0,71 \mu\text{mol CO}_2 \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$) para os genótipos mais produtivos (Max et al., 2022b). O que se torna preocupante, em um cenário de projeções climáticas prevendo restrições pluviométricas nas principais regiões produtoras de café no mundo (IPCC, 2023).

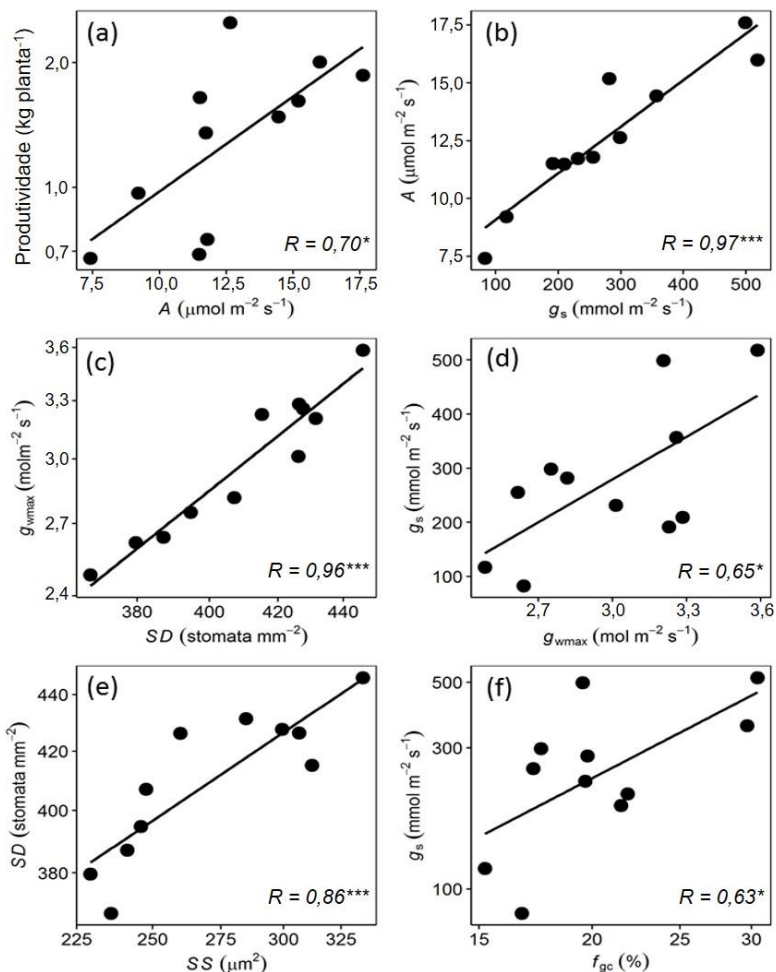


Figura 3. Correlações entre (a) produtividade e a fotossíntese líquida (A); (b) A e condutância estomática (g_s); (c) g_s máxima teórica (g_{wmax}) e densidade estomática (SD); (d) g_s e g_{wmax}; (e) SD e tamanho dos estômatos (SS); (f) g_s e a fração da epiderme alocada aos estômatos (f_{gc}), em 11 genótipos de robustas amazônicas. Cada círculo representa os valores médios para cada genótipo (n = 4). Fonte: Max et al. (2022a)

A EUA e EiUA correspondem à quantidade de carbono fixado durante a fotossíntese para cada molécula de água perdida para atmosfera, de modo

que controle de abertura e fechamento estomático se torna importante para evitar a perda excessiva de água pela transpiração, permitindo a utilização do gás carbônico acumulado nas câmaras subestomáticas e reduzindo a perda de água em condições de déficit hídrico (Taiz et al., 2024).

A condutância estomática (g_s) refere-se à capacidade de troca (taxa de movimentação) entre a saída de vapor de água (transpiração, perda de água pela planta) e entrada de gás carbônico da atmosfera (fotossíntese, assimilação de carbono), através dos estômatos do cafeeiro. De modo que quanto maior for a g_s , teoricamente maior a assimilação de carbono e, consequentemente elevada a perda de água pela transpiração.

Outro fato relevante nesse cenário de mudanças climáticas, refere-se à tendência de elevação da taxa fotossintética nos genótipos mais produtivos, conforme aumenta a demanda por carboidratos nos drenos (raízes, caule, flores e frutos). O que aumentaria a exigência por gás carbônico ao custo de maior abertura estomática, levando à máxima g_s (g_{wmax}) para suprir à quantidade de carbono (Figura 3c), uma vez que a g_{wmax} possui alta correlação com a g_s (Figura 4c). E, consequentemente a g_{wmax} proporcionará perda mais intensiva de água para atmosfera, através do processo transpiratório.

Na região amazônica, a intensa transpiração dos cafeeiros resulta em um dos processos fisiológicos mais importantes para resiliência dos robustas amazônicos, pois além de potencializar a eficiente absorção de água e nutrientes por fluxo de massa, auxilia principalmente na regulação da temperatura interna da planta, o que contribui para melhoria da sua performance fisiológica. Entretanto, mesmo com precipitação na região acima de 2.000 mm anuais quando cultivados em Rondônia, exige-se que os cultivos sejam irrigados no período da estiagem.

Além do incremento constante de estômatos nas folhas dos cafeeiros robustas amazônicos mais produtivos, esse incremento associa-se também ao tamanho desses poros estomáticos. De modo que, quanto mais produtivo for

o genótipo, maior a densidade e tamanho dos seus estômatos nas folhas (Figura 3e) às custas de maior alocação da epiderme aos estômatos (Figura 3f).

De fato, o elevado desempenho fotossintético dos cafeeiros robustas amazônicos está frequentemente associado às taxas transpiratórias intensas, o que aumenta a dependência de alta disponibilidade hídrica. Essa dualidade entre alto potencial produtivo e maior risco de estresse hídrico, torna-se essencial o aprofundamento de estudos ecofisiológicas e a definição de práticas de manejo específicas, principalmente quando cultivado em terras capixabas.

6. Robustas amazônicas: *grande máquina produtora de café*

Sob ponto de vista ecofisiológico e ao considerar todas as características bioquímicas, típicas de vegetais do tipo C3 (metabolismo de fixação de carbono), destacando-se a fotorrespiração quando cultivada em condições de clima tropical, comum na região amazônica. Percebe-se que a adaptação dos cafeeiros robustas às condições edafoclimáticas em Rondônia foi muito dispendiosa para o vegetal tornar-se uma “*grande máquina produtora de café*”.

E, esse alto custo metabólico, advém de alta carga pendente associado ao seu elevado vigor vegetativo (característica genética comum nos robustas). E, isso tem proporcionado evolução fisiológica constante em seus genótipos, ao ponto de que foi necessário a reorganização de todo do seu aparato fotossintético, o que possivelmente ainda continua, com grande possibilidade de ser cada vez mais frequente, frente às alterações climáticas globais.

Essa 'máquina' evolutiva, embora eficiente na Amazônia úmida, pode demandar manejo específico quando cultivado em terras capixabas. E, sugere-se estudos com sombreamento parcial, cobertura do solo constante (natural e/ou sintética), além de construção profunda de perfil de solo na fase de

implantação das novas lavouras comerciais, afim de reduzir a temperatura e conservar a umidade do solo, protegendo a planta.

E, com essa reflexão, finalizamos este capítulo da seguinte forma....”*A continuidade do sucesso dos cafeeiros robustas amazônicos ou de Rondônia em terras capixabas representa oportunidade de resiliência para a cafeicultura no Espírito Santo. Entretanto, requer investimentos estratégicos em pesquisa ecofisiológica para a introdução desses novos genótipos no parque cafeeiro local. De modo que, entender o nível de sensibilidade dessas plantas às condições edafoclimáticas do estado, especialmente em cenários de restrição hídrica agravados pelas mudanças climáticas, torna-se imprescindível para definir as melhores estratégias de manejo e garantir a manutenção da sustentabilidade da cadeia produtiva cafeeira capixaba.*

Referências

- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de café**: Brasília: CONAB, v.12, n.2, segundo levantamento, maio 2025.
- Creek, D.; Lamarque, L.J.; Torres-Ruiz, J.M.; Parise, C.; Burlett, R.; Tissue, D.T. Xylem embolism in leaves does not occur with open stomata: evidence from direct observations using the optical visualization technique. **Journal of Experimental Botany**, v.71, p.1151–1159, 2020.
- Bravin, N.P.; Ferro, L.A.B.; Toni, T.P.; Domingues, C.G.; Silva, C.A.; Dias, J.R.M. Crescimento inicial do cafeeiro robusta submetido a consórcios culturais nas entrelinhas. **Agrarian**, v.13, n.48, p.169-177, 2020.
- Brodribb, T.J.; McAdam, S.A.; Carins Murphy, M.R. Xylem and stomata, coordinated through time and space. **Plant, Cell & Environment**, v.40, p.872–880, 2017.
- DaMatta, F.M.; Avila, R.T.; Cardoso, A.A.; Martins, S.C.V.; Ramalho, J.C. Physiological and agronomic performance of the coffee crop in the context of climate change and global warming: a review. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.66, p.5264–5274. 2018.
- DaMatta, F.M.; Rahn, E.; Läderach, P.; Ghini, R.; Ramalho, J.C. Why could the coffee crop endure climate change and global warming to a greater extent than previously estimated? **Climatic Change**, v.152, p.167–178, 2019.
- Dias, J.R.M.; Franco, G.Y.; Carmo, K.G.; Parcio, J.A.; Silva, S.A. Robustas amazônicas 50+: gênese, estabelecimento, evolução, fortalecimento, perspectivas e potencialidades da cadeia produtiva do café em Rondônia. In: Partelli, F.L.;

- Zucolotto, M. (Org.). **Café conilon: inteligência artificial e manejo sustentável**. 24. ed. São Mateus: UFES, 2024, p.87-100.
- Duursma, R.A.; Blackman, C.J.; Lopéz, R.; Martin-StPaul, N.K.; Cochard, H.; Medlyn, B.E. On the minimum leaf conductance: its role in models of plant water use, and ecological and environmental controls. **New Phytologist**, v.221, p.693–705, 2019.
- Garavito, A.; Montagnon, C.; Guyot, R.; Bertrand, B. Identification by the DArTseq method of the genetic origin of the *Coffea canephora* cultivated in Vietnam and Mexico. **BMC Plant Biology**, v.16, n.1, p.242, 2016.
- Gomes, L.C.; Bianchi, F.J.J.A.; Cardoso, I.M.; Fernandes, R.B.A.; Filho, E.I.F.; Schulte, R.P.O. Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production: a spatially explicit assessment in Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.294, p.106858, 2020.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2021: the physical science basis**. Cambridge: United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2023.
- Lima, I.M.; Ventura, J.A.; Costa, H.; Souza, S.F.; Moraes, W.B.; Verdin Filho, A.C. **Cancro dos ramos do cafeeiro (*Coffea canephora*)**. Vitória: INCAPER, 2023. 21p.
- Lobell, D.B.; Roberts, M.J.; Schlenker, W.; Braun, N.; Little, B.B.; Rejesus, R.M. Greater sensitivity to drought accompanies maize yield increase in the U.S. Midwest. **Science**, v.344, p. 516–519, 2014.
- Machado Filho, J.A.; Rodrigues, W.P.; Baroni, D.F.; Pireda, S.; Campbell, G.; de Souza, G.A.R.; Verdin Filho, A.C.; Arantes, S.D.; Arantes, L.O.; Cunha, M. Linking root and stem hydraulic traits to leaf physiological parameters in *Coffea canephora* clones with contrasting drought tolerance. **Journal of Plant Physiology**, v.258, p.153355, 2021.
- Machado, R.; Loram-Lourenço, L.; Farnese, F.S.; Alves, R.D.F.B.; Sousa, L.F.; Silva, F.G. Where do leaf water leaks come from? Trade-offs underlying the variability in minimum conductance across tropical savanna species with contrasting growth strategies. **New Phytologist**, v.229, p.1415–1430, 2021.
- Martin-StPaul, N.; Delzon, S.; Cochard, H. Plant resistance to drought depends on timely stomatal closure. **Ecology Letters**, v.20, p.1437–1447, 2017.
- Martins, S.C.V.; Sanglard, M.L.; Morais, L.E.; Menezes-Silva, P.E.; Mauri, R.; Avila, R.T. How do coffee trees deal with severe natural droughts? An analysis of hydraulic, diffusive and biochemical components at the leaf level. **Trees**, v.33, p.1679–1693, 2019.
- Mauri, R.; Cardoso, A.A.; da Silva, M.M.; Oliveira, L.A.; Avila, R.T.; Martins, S.C.V. Leaf hydraulic properties are decoupled from leaf area across coffee species. **Trees-Structure and Function**, v.34, p.1507–1514, 2020.
- Max, A.C.; Lourenço-Loram, L.; Silva, F.G.; Souza, L.H.M.; Dias, J.R.M.; Espindula, M.C.; Farnese, F.S.; Hammond, W.; Torres-Ruiz, J.M.; Cochard, H.; Menezes-Silva, P.E. A bitter future for coffee production? Physiological traits associated with yield reveal high vulnerability to hydraulic failure in *Coffea canephora*. **Plant, Cell & Environment**, v.46, p.764-779, 2022a.
- Max, A.C.; Menezes-Silva, P.E.; Santos, T.R.; Lourenço-Loram, L.; Ávila, R.G.; Silva, A.R.; Silva, F.H.L.; Espindula, M.C.; Dias, J.R.M.; Silva, F.G. Seasonal variation in

- physiological traits of Amazonian *Coffea canephora* genotypes in cultivation Systems with contrasting water availability. **Agronomy**, v.12, p.3197, 2022b.
- McAdam, S.A.M.; Eléouët, M.P.; Best, M.; Brodribb, T.J.; Murphy, M.C.; Cook, S.D. Linking auxin with photosynthetic rate via leaf venation. **Plant Physiology**, v.175, p.351–360, 2017.
- McDowell, N.G.; Sapes, G.; Pivovarov, A.; Adams, H.D.; Allen, C.D.; Anderegg, W.R.L. Mechanisms of woody-plant mortality under rising drought, CO₂ and vapour pressure deficit. **Nature Reviews Earth & Environment**, v.3, p.294–308, 2022.
- Menezes-Silva, P.E.; Cavatte, P.C.; Martins, S.C.V.; Reis, J.V.; Pereira, L.F.; Ávila, R.T. Wood density, but not leaf hydraulic architecture, is associated with drought tolerance in clones of *Coffea canephora*. **Trees**, v.29, p.1687–1697, 2015.
- Rondelli, V.M.; Peronti, A.L.B.G.; Dias, J.R.M.; Fogaça, I.; Santos, I.L.V. dos; Nery, A.G. New records of mealybugs (Hemiptera: Pseudococcidae) infesting rosettes of conilon coffee plants in the state of Rondônia, South-Western Amazon, Brazil. **Florida Entomologist**, v.101, n.4, p.705-707, 2018.
- Scoffoni, C.; Sack, L. The causes and consequences of leaf hydraulic decline with dehydration. **Journal of Experimental Botany**, v.68, p.4479–4496, 2017.
- Silva, L.D., Leichtweis, B.G., Silva, A.C.A., Rocha, R.B., Teixeira, A.L., Caixeta, E.T. Fingerprinting Amazonian coffees: assessing diversity through molecular markers. *Euphytica*, v. 220, p. 1-17, 2024.
- Taiz, L.; Moller, I.M.; Murphy, A.; Zeiger, E. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 7. ed. Porto Alegre: Artmed, 2024. 864p.
- Venancio, L.P.; Filgueiras, R.; Mantovani, E.C.; Amaral, C.H.; Cunha, F.F.; Silva, F. C. S.; Althoff, D.; Santos, R.A.; Cavatte, P.C. Impact of drought associated with high temperatures on *Coffea canephora* plantations: a case study in Espírito Santo State, Brazil. **Scientific Reports**. v.10, p. 1-21, 2020.

CAPÍTULO 11

Radiação solar no cafeeiro: desafios e adaptações para o sucesso no pós-transplântio

Anne Reis Santos

Wallace de Paula Bernado

Guilherme Augusto Rodrigues de Souza

Eliemar Campostrini

Weverton Pereira Rodrigues

1. Introdução

A fase pós-transplântio é determinante para a sobrevivência do cafeeiro. Para o sucesso desse período inicial de crescimento e desenvolvimento, é necessária a aclimação adequada para tolerar os fatores ambientais do novo ambiente.

O pós-transplântio é um período crítico para o crescimento e desenvolvimento vegetal principalmente devido ao estabelecimento do sistema radicular, o que pode potencializar a sensibilidade do cafeeiro aos fatores ambientais, como a exposição à radiação solar, durante esse período (Siqueira et al., 2022). Nessa fase, são comuns sintomas de estresses abióticos, como escaldadura foliar (*sunburn*), amarelecimento das folhas e retardo do crescimento (tanto na raiz quanto na parte aérea) (Chen et al., 2025).

Tais sintomas não apenas atrasam o crescimento inicial da planta, mas também causam um efeito negativo a longo prazo. Isso ocorre devido ao estresse fisiológico que pode retardar o estabelecimento da planta no campo, com efeitos negativos sobre a produtividade da lavoura.

2. Radiação solar: conceitos e relevância para a cafeicultura

Principais espectros de radiação para as plantas

A radiação solar é essencial para a fotossíntese e para a regulação de processos fotomorfogênicos. Entretanto, essa radiação pode atuar como um potencial causador de danos irreversíveis, a depender da intensidade, tempo de exposição e qualidade espectral da radiação solar, assim como dos processos adaptativos de cada espécie ou genótipo para tolerar ou resistir aos possíveis danos (Correa et al., 2023; Goh et al., 2012).

A radiação ultravioleta (UV) é o espectro da radiação solar que possui mais energia (menor comprimento de onda e maior frequência), sendo a radiação UV-A (315-400 nm), reguladora de processos fotomorfogênicos e a radiação UV-B (280-315 nm), responsável pelos danos mais severos em nível molecular e potencialmente irreversíveis (Ballaré et al., 2011; Jenkins, 2009), incluindo a inibição da ressíntese dos pigmentos fotossintéticos (Surabhi et al., 2009).

O espectro da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) inclui o espectro visível (400-700 nm) e estudos recentes apontam parte do vermelho distante (até 750 nm) como radiação que também contribui para a fotossíntese (Zhen e Bugbee, 2020). Esse espectro é fundamental também para a fotomorfogênese, acúmulo de biomassa e processos adaptativos (Arnon, 1971; Blankenship, 2002). Entretanto, a exposição excessiva pode causar fotoinibição, especialmente em combinação com radiação UV, induzindo fechamento estomático, acúmulo de carotenoides e antocianinas, e ativação de sistemas antioxidantes (Demmig-Adams e Adams, 2006).

A radiação infravermelha solar (850–1.000 nm) regula processos como a germinação, florescimento e crescimento radicular (Lee et al., 2017; Liu et al., 2016). A absorção dessa radiação eleva a temperatura foliar, o que pode causar alterações na condutância estomática e na transpiração, levando a danos oxidativos (Blum et al., 1982; Buitrago et al., 2016; Hou et al., 2018; Ullah et al., 2012).

Benefícios x riscos do excesso de radiação

A exposição direta à radiação solar exige mecanismos adaptativos do cafeeiro, para que possa ser favorecido, e tolerar a ação do estresse severo que pode ser causado pela radiação em intensidade supra-ótima. Em regiões tropicais, países de grande relevância na produção cafeeira apresentam uma depleção da camada de ozônio que confere maior intensidade da irradiação solar (Lu, 2022). A elevada radiação solar é intrínseca à elevada intensidade da radiação UV, a qual possui alto potencial de causar estresse fisiológico no cafeeiro, que é cultivado majoritariamente a pleno sol (Bornman, 1989; Glenn et al., 2010).

O cafeeiro possui plasticidade fenotípica, portanto adapta sua morfologia a diferentes condições de luminosidade, mantendo sua produtividade em distintos ambientes de cultivo (Fahl et al., 2009). Entretanto, tais adaptações exigem um custo fisiológico, como alterações na eficiência fotossintética e alterações morfológicas. Se esse custo fisiológico é alto (em casos de estresse severo), a energia produzida pela planta é gasta nessas adaptações e na ativação de mecanismos protetores. Esses eventos de estresse podem reduzir a disponibilidade de energia para crescimento e frutificação, comprometendo a produtividade (Cavatte et al., 2012; López, 2012). Como exemplo, sob condição de estresse, o cafeeiro pode alocar maior energia para a manutenção do processo fotossintético, e assim, menor energia é alocada para o crescimento (Bernado et al., 2021; Kataria e Guruprasad, 2015). Isso ocorre, pois o metabolismo vegetal produz uma quantidade de

energia limitada, que pode ser alocada para defesa, crescimento ou produtividade, processos competitivos entre si (Niinemets, 2001).

3. Radiação solar e o manejo de mudas

A radiação solar é um dos principais fatores ambientais que condicionam o desenvolvimento de mudas, impactando diretamente processos como fotossíntese e fotomorfogênese. Esses efeitos ocorrem principalmente por meio da radiação UV e RFA. As plantas não respondem apenas à intensidade da radiação incidente, mas também à sua qualidade espectral, uma vez que diferentes faixas do espectro eletromagnético são percebidas por fotorreceptores específicos e desencadeiam respostas distintas no metabolismo e no crescimento (Borbély et al., 2022; Paradiso e Proietti, 2022; Pierik e Ballaré, 2021). Assim, compreender como a intensidade (quantidade) e a composição espectral (qualidade) da radiação solar afetam as plantas é fundamental para o manejo de mudas. A intensidade refere-se à energia total de luz que chega às folhas (em geral medida como a densidade de fluxo de fótons), enquanto a qualidade diz respeito às diferentes faixas do espectro eletromagnético (UV, RFA e infravermelho) que influenciam respostas fisiológicas e morfológicas específicas, como fotossíntese, alongamento de ramos e expansão foliar. A relação entre qualidade e quantidade da radiação incidida é relevante, já que tanto a limitação quanto o excesso de radiação podem comprometer o vigor, a sobrevivência e o desempenho das plantas na fase de aclimação, e no campo.

O processo de aclimação deve promover a exposição gradual para evitar taxa de mortalidade ou *sunburn* da muda após o transplântio para o campo, assim como deve promover a exposição suficiente à radiação ao final da fase de aclimação, para proporcionar um sistema de defesa robusto para a planta, de forma que seu desenvolvimento pós transplântio tenha sucesso, pois mesmo com a realização adequada de uma aclimação tradicional em

viveiro, é comum observar taxas de mortalidade significativas ou ocorrência de *sunburn* em mudas recém-transplantadas para o campo (Lin et al., 2024; Unigarro et al., 2023; Wang et al., 2024). Isso ocorre porque o processo de transplantio confere sensibilidade às mudas, devido ao estresse mecânico (intrínseco ao transplantio), caracterizado por interrupção do suprimento radicular, alterações no equilíbrio hídrico e exposição súbita a condições ambientais muito diferentes daquelas em que a raiz foi aclimatada. Esse estresse mecânico desencadeia um estresse fisiológico, associado à transição de ambiente, causado pelas alterações nos fatores abióticos (do novo ambiente) (Agehara e Leskovar, 2012).

As mudanças climáticas globais têm agravado as condições desfavoráveis para as plantas, como aumento da incidência de radiação solar, alteração na umidade do solo e aumento de temperatura do ar, que aumentam a transpiração e reduzem a capacidade de recuperação das mudas na fase pós-transplantio (Mainhart et al., 2024). Esses fatores combinados tornam a fase pós-transplantio um período crítico, no qual a sensibilidade da planta a estresses abióticos é potencializada, mesmo quando houve uma aclimação tradicional adequada.

4. Tecnologias emergentes e perspectivas futuras

Para mitigar os riscos associados ao excesso de radiação solar, os estudos apontam para algumas estratégias de manejo que visam aumentar a tolerância das mudas e reduzir perdas, como a aclimação gradual em viveiro com ajuste progressivo da intensidade luminosa, para reduzir o impacto térmico e luminoso; e otimização da irrigação para reduzir o déficit hídrico durante a fase pós-transplantio.

A orientação e a forma da estrutura do viveiro influenciam diretamente a recepção anual e sazonal da radiação solar, afetando o microclima interno e a eficiência do crescimento das mudas. Considerar a

latitude, a inclinação da área e a orientação em relação ao percurso solar pode melhorar substancialmente o rendimento na produção de mudas, promovendo uma distribuição mais uniforme da luz e minimizando pontos de excesso ou déficit de radiação (Robson et al., 2022). Essas estratégias, quando combinadas com sombreamento parcial, aclimação gradual e outras práticas de manejo, contribuem para otimizar a fotossíntese, reduzir estresse por UV, e aumentar a sobrevivência e vigor das mudas no momento do transplântio.

Priming (pré-condicionamento)

Pesquisas recentes também indicam que pré-condicionamento controlado das mudas, expondo-as a doses moderadas de estresse abiótico (tecnologia denominada “*priming*”), pode ativar mecanismos de defesa fisiológicos e bioquímicos, como a síntese de flavonoides e compostos fenólicos, ou o acúmulo de antocianinas e carotenoides (compostos fotoprotetores), além de alterações anatômicas e morfológicas. A ativação eficiente dos mecanismos de defesa no *priming*, aumenta a resiliência na adaptação às condições de campo (fase pós-transplântio) (Chalker-Scott e Fuchigami, 2018; Thomas e Puthur, 2017). No cenário climático que vem se agravando, compreender esses processos é essencial, pois apenas a aclimação tradicional, sem ajustes finos às condições do cenário atual do campo, muitas vezes não é suficiente para garantir a sobrevivência e o desenvolvimento inicial das mudas (Novaes et al., 2010; Vilas-Boas et al., 2023). Portanto, quanto mais eficiente for a aplicação da tecnologia de produção de mudas, especialmente na fase de aclimação, menor será o impacto negativo do transplântio sobre o crescimento e desenvolvimento das plantas no campo (Pagoto e Oliveira, 2019).

Os danos do estresse são irreversíveis apenas quando as alterações no metabolismo vegetal são incapazes de serem remediadas pelos mecanismos de defesa. Entretanto, quando o estresse é controlado, tais mecanismos são acionados, e não há danos permanentes do estresse (Mauch-Mani et al., 2017).

O pré-condicionamento a condições de estresse, expondo-as a doses controladas de um fator de estresse, possibilita o desenvolvimento de um sistema robusto de mecanismos de defesa, que promove a tolerância a eventos subsequentes de estresse, ou resulta em respostas futuras mais rápidas a esses eventos (Thomas e Puthur, 2017). Desta forma, a ativação pré-condicionada dos mecanismos protetores é essencial para a sobrevivência, crescimento e produtividade das plantas, principalmente considerando o ambiente de pós-transplântio a pleno sol do cafeeiro.

Uso de LEDs e radiação artificial

O uso de radiação artificial, em especial por meio de LEDs (Light Emitting Diodes), tem se mostrado uma ferramenta promissora para o manejo de mudas. Em diferentes espécies agrícolas e florestais, a suplementação luminosa tem sido associada ao aumento de compostos fenólicos, maior eficiência fotossintética, redução do tempo de aclimação e incremento da tolerância a estresses bióticos e abióticos. Para o cafeeiro, trata-se de um campo ainda pouco explorado, mas promissor. Os resultados apontam para diferentes vantagens: não apenas a otimização econômica da produção de mudas e redução do período de ciclo de produção nos viveiros, mas a melhoria da qualidade fisiológica dessas plantas (sistema de defesa contra estresses) (Ahmadi et al., 2020).

A aplicação de LEDs pode acelerar o crescimento vegetativo, permitindo reduzir o tempo de permanência das mudas no viveiro e antecipar o transplântio para o campo. Esse aspecto representa um avanço importante para a cadeia produtiva, pois impacta diretamente nos custos de produção, mesmo que a longo prazo. No entanto, além do crescimento em altura e biomassa, é fundamental considerar a qualidade fisiológica das mudas produzidas, focando em seu sistema de defesa para ter sucesso no desenvolvimento pós-transplântio.

Plantas submetidas a um regime de suplementação luminosa adequado otimizam o crescimento (devido à maior assimilação de CO₂) e recebem radiação suficiente para preparar seu sistema de defesa (pré-condicionamento), que está associado ao maior acúmulo de metabólitos secundários e desenvolvimento de mecanismos antioxidantes, os quais desempenham papel crucial na fase pós-transplântio. Tais respostas têm sido estudadas majoritariamente com combinações de luz do espectro RFA, com possível potencial de uso também da radiação UV em doses baixas e controladas, adaptadas a cada espécie (Yang et al., 2024).

Nesse contexto, o desafio consiste em equilibrar a velocidade de crescimento com a preparação bioquímica e metabólica das mudas, de modo a garantir que elas cheguem ao campo não apenas com tamanho adequado em menos tempo, mas também com um sistema de defesa eficiente para enfrentar as intempéries ambientais, como elevada radiação solar, déficit hídrico e variações de temperatura. Assim, a suplementação luminosa via LEDs deve ser entendida não apenas como uma estratégia de aceleração do ciclo de produção, mas como uma ferramenta de manejo para a formação de mudas fisiologicamente mais aptas a suportar o estresse inicial que é comum após o transplântio, principalmente nos cenários desfavoráveis que já se mostram recorrentes devido às alterações climáticas, visto que o cafeeiro é transplantado majoritariamente para lavouras à pleno sol.

Perspectivas futuras no campo

Além das estratégias para aumentar a tolerância de mudas que serão transplantadas para áreas a pleno sol, outras estratégias são focadas na fase pós-transplântio e cultivo no campo, com a proposta de atenuar os efeitos da alta intensidade de radiação solar sobre as plantas cultivadas, como por exemplo a aplicação de filmes protetores, como o filme de partículas de caulinita processada sobre as folhas, ou estratégias já bem conhecidas, como os consórcios agroflorestais, que proporcionam sombreamento natural

(Bernado et al., 2024; De Abreu et al., 2022), ou ainda estratégias emergentes como os sistemas “agrovoltaicos”.

Os cafeeiros são caracterizados como plantas que toleram sombra, e por isso, o cultivo de cafeeiros sob condições de agrofloresta já é amplamente estudado e demonstra efeitos significativos sobre a sustentabilidade, produtividade e mesmo sobre a qualidade de bebida (Nasiro, 2024). Com objetivos semelhantes aos sistemas de agrofloresta, os chamados “sistemas agrovoltaicos” (AV) (Goetzberger e Zastrow, 1982); têm sido amplamente estudados, especialmente na União Europeia e Ásia, e são assim denominados, pois permitem o uso dual de terras para a geração de energia fotovoltaica (FV) e produção de alimentos.

A implantação de sistemas FV, em muitos casos, envolve a cobertura parcial ou total do solo, o que compromete o uso destas terras para a agricultura (Krasner et al., 2025). No entanto, o uso dos sistemas AV, que se baseiam na tolerância de sombra parcial pelas plantas e na redução do consumo de água via evapotranspiração (Dinesh e Pearce, 2016) tem sido estudado para muitas culturas como alface, repolho, batatas, milho, arroz, oliva e pera (Coşgun et al., 2024; Magarelli et al., 2024). De acordo com estudos recentes, o uso de sistemas AV melhora o microclima abaixo dos painéis FV, o que reduz o estresse térmico de culturas, ajuda a manter a umidade do solo, reduzindo a necessidade de irrigação, e protege o ecossistema na área de cultivo (Asa’a et al., 2024). Devido a estas características semelhantes aos sistemas agroflorestais, estudos atuais e futuros com o uso de sistemas AV para cultivos de café ao redor do mundo podem criar uma tendência de mercado cafeeiro, considerando uma agricultura mais sustentável. De fato, ainda são necessários estudos futuros para superar os desafios relacionados ao manejo cultural sob sistemas AV, especialmente em plantios mecanizados e semimecanizados, nos quais a presença dos painéis pode limitar o espaço e a mobilidade de maquinários

agrícolas. A adaptação de práticas de cultivo, bem como o desenvolvimento de tecnologias adequadas de mecanização, será essencial para viabilizar a ampla adoção desses sistemas em escala comercial, garantindo eficiência produtiva sem comprometer os benefícios ambientais observados.

5. Conclusão

A radiação solar pode atuar como aliada ou não no cultivo do cafeeiro, dependendo de sua intensidade, qualidade espectral, do estágio fenológico da planta e de suas adaptações para responder à radiação. O manejo adequado, desde a fase de viveiro até o estabelecimento em campo, é essencial para reduzir perdas e evitar estresse severo na fase pós-transplântio, de forma a maximizar a produtividade a longo prazo.

Compreender como a luz afeta a dinâmica fisiológica do cafeeiro permite não apenas ajustar práticas de produção de mudas e de cultivo tradicionais, mas também abrir espaço para o uso de tecnologias emergentes. Nesse sentido, a radiação solar deve ser compreendida não apenas como um recurso natural não controlável, mas como um fator de manejo estratégico, fundamental para uma cafeicultura mais eficiente e resiliente às mudanças climáticas.

Referências

- Ahmadi, T.; Shabani, L.; Sabzalian, M.R. LED light mediates phenolic accumulation and enhances antioxidant activity in *Melissa officinalis* L. under drought stress condition. **Protoplasma**, v.257, p.1231–1242, 2020.
- Asa'a, S.; Reher, T.; Rongé, J.; Diels, J.; Poortmans, J.; Radhakrishnan, H.S.; Van Der Heide, A.; Van De Poel, B.; Daene, M. A multidisciplinary view on agrivoltaics: Future of energy and agriculture. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.200, p.114515, 2024.
- Ballaré, C.L.; Caldwell, M.M.; Flint, S.D.; Robinson, S.A.; Bornman, J.F. Effects of solar ultraviolet radiation on terrestrial ecosystems. Patterns, mechanisms, and interactions with climate change. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v.10, p.226–241, 2011.

- Bernado, W.D.P.; Santos, A.R.; Vale, E.M.; Pireda, S.; Correia, L.Z.; Souza, G.A.R.; Abreu, D.P.; Carvalho, L.K.O.; Almeida, F.A.; Baroni, D.F.; Partelli, F.L.; Bressan-Smith, R.H.; Rakocevic, M.; Ramalho, J.C.; Campostrini, E. Rodrigues, W.P. UV-B reduction and excess: Management strategies regarding *Coffea* sp. crop. **Scientia Horticulturae**, v.323, p.112499, 2024.
- Bernado, W.P.; Rakocevic, M.; Santos, A.R.; Ruas, K.F.; Baroni, D.F.; Abraham, A.C.; Pireda, S.; Oliveira, D.S.; daCunha, M.; Ramalho, J.C.; Campostrini, E.; Rodrigues, W.P. Biomass and Leaf Acclimations to Ultraviolet Solar Radiation in Juvenile Plants of *Coffea arabica* and *C. canephora*. **Plants**, v.10, p.640, 2021.
- Blankenship, R.E. Molecular Mechanisms of Photosynthesis. **Wiley**, 2002.
- Blum, A.; Mayer, J.; Gozlan, G. Infrared thermal sensing of plant canopies as a screening technique for dehydration avoidance in wheat. **Field Crops Research**, v.5, p.137–146, 1982.
- Borbély, P.; Gasperl, A.; Pálmai, T.; Ahres, M.; Asghar, M.A.; Galiba, G.; Müller, M.; Kocsy, G. Light Intensity- and Spectrum-Dependent Redox Regulation of Plant Metabolism. **Antioxidants**, v.11, p.1311, 2022.
- Bornman, J.F. New trends in photobiology. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v.4, p.145–158, 1989.
- Buitrago, M.F.; Groen, T.A.; Hecker, C.A.; Skidmore, A.K. Changes in thermal infrared spectra of plants caused by temperature and water stress. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.111, p.22–31, 2016.
- Cavatte, P.C.; Rodríguez-López, N.F.; Martins, S.C.V.; Mattos, M.S.; Sanglard, L.M.V.P.; DaMatta, F.M. Functional analysis of the relative growth rate, chemical composition, construction and maintenance costs, and the payback time of *Coffea arabica* L. leaves in response to light and water availability. **Journal of Experimental Botany**, v.63, p.3071–3082, 2012.
- Chalker-Scott, L.; Fuchigami, L.H. The Role of Phenolic Compounds in Plant Stress Responses. In: Low Temperature Stress Physiology in Crops. **CRC Press**, p.767–796, 2018.
- Chen, C.; Reely, J.A.; Nelson, A.S. Early field performance of three planted inland northwest conifer species: Effects of root growth potential, morphology, and environmental conditions. **Forest Ecosystems**, v.12, p.100280, 2025.
- Correa, M.D.S.S.; Saavedra, M.R.R.; Parra, E.A.E.; Ontiveros, E.N.; Flores, J.B.C.; Montiel, J.G.O.; Contreras, J.E.C.; Urrutia, E.L.; Acevedo, J.G.A.; Nopala, G.E.J.; González, A.M.E. Ultraviolet Radiation and Its Effects on Plants. In: Oliveira, M. and Fernandes-Silva, A. (eds.) Abiotic Stress in Plants - Adaptations to Climate Change. **IntechOpen**, 2023.
- Coşgun, A.E.; Endiz, M.S.; Demir, H.; Özcan, M. Agrivoltaic systems for sustainable energy and agriculture integration in Turkey. **Heliyon**, v.10, e32300, 2024.
- De Abreu, D.P.; Roda, N.D.M.; De Abreu, G.P.; Bernado, W.P.; Rodrigues, W.P.; Campostrini, E.; Rakocevic, M. Kaolin Film Increases Gas Exchange Parameters of Coffee Seedlings During Transference From Nursery to Full Sunlight. **Frontiers in Plant Science**, v.12, p.784482, 2022.

- Demmig-Adams, B.; Adams, W.W. Photoprotection in an ecological context: the remarkable complexity of thermal energy dissipation. **New Phytologist**, v.172, p.11–21, 2006.
- Dinesh, H.; Pearce, J.M. The potential of agrivoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.54, p.299–308, 2016.
- Fahl, J.I.; Carelli, M.L.C.; Queiroz-Voltan, R.B.; Dias, A.A.; de Camargo, B.P. Efeitos de níveis de luz na floração, frutificação e produtividade de plantas de *Coffea arabica*. **VI Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**, 2009.
- Glenn, D.M.; Cooley, N.; Walker, R.; Clingeffer, P.; Shellie, K. Impact of Kaolin Particle Film and Water Deficit on Wine Grape Water Use Efficiency and Plant Water Relations. **Horticultural Science**, v.45, p.1178–1187, 2010.
- Goetzberger, A.; Zastrow, A. On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. **International Journal of Solar Energy**, v.1, p.55–69, 1982.
- Goh, C.H.; Ko, S.-M.; Koh, S.; Kim, Y.-J.; Bae, H.-J. Photosynthesis and Environments: Photoinhibition and Repair Mechanisms in Plants. **Journal of Plant Biology**, v.55, p.93–101, 2012.
- Hou, M.; Tian, F.; Zhang, L.; Li, S.; Du, T.; Huang, M.; Yuan, Y.. Estimating Crop Transpiration of Soybean under Different Irrigation Treatments Using Thermal Infrared Remote Sensing Imagery. **Agronomy**, v.9, p.8, 2018.
- Jenkins, G.I. Signal Transduction in Responses to UV-B Radiation. **Annual Review of Plant Biology**, v.60, p.407–431, 2009.
- Kataria, S.; Guruprasad, K.N. Exclusion of solar UV radiation improves photosynthetic performance and yield of wheat varieties. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.97, p.400–411, 2015.
- Krasner, N.Z.; Fox, J.; Armstrong, A.; Ave, K.; Carvalho, F.; Li, Y.; Walston, L.J.; Ricketts, M.O.; Jordaan, S.M.; Abou Najm, M.; Hartmann, H.M.; Lybrand, R.; Hernandez, R.R. Impacts of photovoltaic solar energy on soil carbon: A global systematic review and framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.208, p.115032, 2025.
- Lee, H.-J.; Park, Y.-J.; Ha, J.-H.; Baldwin, I.T.; Park, C.-M. Multiple Routes of Light Signaling during Root Photomorphogenesis. **Trends in Plant Science**, v.22, p.803–812, 2017.
- Lin, Y.; Chao, K.; Song, G.M.; Chao, W.; Chang-Yang, C.; Hsieh, C. Intense light and conspecific density increase seedling mortality across age groups in a typhoon-disturbed tropical forest. **Journal of Vegetation Science**, v.35, e13309, 2024.
- Liu, B.; Yang, Z.; Gomez, A.; Liu, B.; Lin, C.; Oka, Y. Signaling mechanisms of plant cryptochromes in *Arabidopsis thaliana*. **Journal of Plant Research**, v.129, p.137–148, 2016.
- López, N.F.R. **Ecophysiological Acclimation of Coffee (*Coffea arabica* and *C. canephora*) Plants to Cope with Temporal Fluctuations of Light Supply**. Viçosa. Universidade Federal de Viçosa. 2012, 71p.
- Lu, Q.B. Observation of large and all-season ozone losses over the tropics. **AIP Advances**, v.12, p.075006, 2022.

- Magarelli, A.; Mazzeo, A.; Ferrara, G. Fruit Crop Species with Agrivoltaic Systems: A Critical Review. **Agronomy**, v.14, p.722, 2024.
- Mainhart, D.E.; Christoffersen, B.O.; Thompson, R.A.; Reemts, C.M.; Fierro-Cabo, A. Preparing for the Worst: Enhancing Seedling Traits to Reduce Transplant Shock in Semi-Arid Regions. **Forests**, v.15, p.1607, 2024.
- Mauch-Mani, B.; Baccelli, I.; Luna, E.; Flors, V. Defense Priming: An Adaptive Part of Induced Resistance. **Annual Review of Plant Biology**, 68: 485–512, 2017.
- Nasiro, K. The Benefits of Agroforestry Coffee Production Systems: A Review. **World Journal of Food Science and Technology**, 8: 86–105, 2024.
- Niinemets, Ü. Global-Scale Climatic Controls of Leaf Dry Mass per Area, Density, and Thickness in Trees and Shrubs. **Ecology**, 82: 453–469, 2001.
- Novaes, P.; Souza, J.P.; Assis Prado, C.H.B. Improving the development of *Coffea arabica* after changing the pattern of leaf gas exchange by watering cycles. **Experimental Agriculture**, 46: 381–391, 2010.
- Pagoto, A.L.R.; Oliveira, V.S. Initial Development of Clonal Seedlings of *Coffea canephora* Submitted to Different Irrigation Depth. **International Journal of Plant & Soil Science**, 1–7, 2019.
- Paradiso, R.; Proietti, S. Light-Quality Manipulation to Control Plant Growth and Photomorphogenesis in Greenhouse Horticulture: The State of the Art and the Opportunities of Modern LED Systems. **Journal of Plant Growth Regulation**, 41: 742–780, 2022.
- Pierik, R.; Ballaré, C.L. Control of Plant Growth and Defense by Photoreceptors: From Mechanisms to Opportunities in Agriculture. **Molecular Plant**, 14: 61–76, 2021.
- Robson, T.M.; Pieristè, M.; Durand, M.; Kotilainen, T.K.; Aphalo, P.J. The benefits of informed management of sunlight in production greenhouses and polytunnels. **Plants People Planet**, 4: 314–325, 2022.
- Siqueira, J.A.; Otoni, W.C.; Araújo, W.L. The hidden half comes into the spotlight: Peeking inside the black box of root developmental phases. **Plant Communications**, 3: 100246, 2022.
- Surabhi, G.K.; Reddy, K.R.; Singh, S.K. Photosynthesis, fluorescence, shoot biomass and seed weight responses of three cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) cultivars with contrasting sensitivity to UV-B radiation. **Environmental and Experimental Botany**, 66: 160–171, 2009.
- Thomas, D.T.T.; Puthur, J.T. UV radiation priming: A means of amplifying the inherent potential for abiotic stress tolerance in crop plants. **Environmental and Experimental Botany**, 138: 57–66, 2017.
- Ullah, S.; Skidmore, A.K.; Naeem, M.; Schlerf, M. An accurate retrieval of leaf water content from mid to thermal infrared spectra using continuous wavelet analysis. **Science of The Total Environment**, 437: 145–152, 2012.
- Unigarro, C.A.; Imbachi Quinchua, L.C.; Cañon Hernandez, M.; Acuña Zornosa, J.R. Response to applying kaolinite particles in coffee variety Cenicafe 1 seedlings during the nursery stage. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, 22: 298–308, 2023.

- Vilas-Boas, T.; Duarte, A.A.; Della Torre, F.; Lovato, M.B.; Lemos-Filho, J.P. Does acclimation in distinct light conditions determine differences in the photosynthetic heat tolerance of coffee plants? **Plant Biology Journal**, 25: 1101–1108, 2023.
- Wang, T.; Sun, D.; Xiong, W.; Kuang, F; Xue, K.; Shi, M.; Xi, D.; Zhu, D. Impact of root-stem coupling damage from mechanical transplanting on the growth of large rice seedlings. **Plant Growth Regulation**, 104: 1075–1086, 2024.
- Yang, H.; Kim, Y.; Bae, Y.; Hyeon, S.; Jang, D. Acclimation and hardness enhancement through ultraviolet-B irradiation of fruit vegetable seedlings grown in a plant factory with artificial light. **Horticulture Environment and Biotechnology**, 65: 771-783, 2024.
- Zhen, S.; Bugbee, B. Substituting Far-Red for Traditionally Defined Photosynthetic Photons Results in Equal Canopy Quantum Yield for CO₂ Fixation and Increased Photon Capture During Long-Term Studies: Implications for Re-Defining PAR. **Frontiers in Plant Science**, 11: 581156, 2020.

CAPÍTULO 12

***Coffea canephora*: microbiota do cafeeiro e qualidade do café em função das condições climáticas**

Marliane de Cássia Soares da Silva

José Maria Rodrigues da Luz

Karen Mirella Souza Menezes

Aldemar Polonini Moreli

Lucas Louzada Pereira

1. Introdução

No ano da 30ª Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP30) a ser realizada em Belém do Pará, a campanha da rede Globo de televisão “Cadê o sabor que estava aqui?” faz uma indagação a sociedade sobre a possibilidade de acabar com alguns sabores da nossa mesa como o café, o açaí e o chocolate (Globo 2025). O impacto sobre importantes culturas como o café é preocupante no âmbito sócio econômico, ambiental e político. Além disso, cerca de 40% do produto interno bruto agrícola do Espírito Santo é oriundo do cultivo de café (Inaper 2025).

Os perfis sensoriais do café dependem de parâmetros climáticos, microbianos e químicos que têm sido influenciados pelas mudanças climáticas. Os estudos realizados em diferentes altitudes e regiões do estado do ES com plantio de café conilon foram observadas variações de mais de 10

°C na amplitude térmica (temperatura mínima e máxima) nas lavouras nas safras de 2020 a 2022 (Tabela 1). As precipitações pluviométricas têm sido irregulares com uma maior concentração no verão quando a radiação solar também é elevada sobre as lavouras de café (Tabela 1). Neste contexto, a compreensão da dinâmica desses parâmetros pode auxiliar em ações mitigadoras dos impactos das mudanças climáticas sobre a produção de café. Assim, a produção de café conilon precisa estar alinhada à sustentabilidade da lavoura, qualidade sensorial e a segurança alimentar.

Tabela 1. Altitude, tipo de solo e condições edafoclimáticas das regiões de produção de café conilon em municípios do estado do Espírito Santos, Brasil. Os valores da temperatura, precipitação e radiação solar são as médias das medidas mensais

Variáveis do solo e clima		Altitude das fazendas (m)		
		514	714	822
Tipo de solo		Cambissolo háplico		Nitossolo vermelho
Temperatura anual (°C)	Mínima	15,35 ± 2,38	12,80 ± 4,59	13,23 ± 2,43
	Média	20,72 ± 2,11	18,45 ± 2,10	19,18 ± 2,15
	Máxima	26,08 ± 1,92	24,06 ± 1,87	25,10 ± 1,93
Precipitação (mm)		98,66 ± 6,26	106,16 ± 5,77	104,75 ± 6,39
Radiação solar (kJ m ⁻² dia ⁻¹)		15553,33 ± 2862,15	15101,75 ± 2640,31	14975,00 ± 2536,76

Fonte: Autores. Média ± desvio padrão

A mitigação dos impactos das mudanças climáticas na cultura do café passa pela compreensão do papel da microbiota dos cafezais (solo e fruto) na fertilidade, no controle de patógenos, na promoção de crescimento vegetal e

na formação de frutos. A indissociabilidade entre os fatores ambientais e a produção de café é fundamental para entender o processo agrícola dentro de um ecossistema que envolve o crescimento da planta do café e suas interações com a comunidade microbiana do solo. Além disso, as mudanças climáticas afetam a disponibilidade de água e nutrientes no solo e a diversidade microbiana do solo auxilia as plantas na captação, manutenção e reciclagem desses recursos no solo. Veloso et al. (2020) mostraram que há uma co-ocorrência entre microrganismos do solo e do fruto do café. Segundo esses autores, esse compartilhamento influencia no crescimento da planta e na produção de frutos sadios que reflete na qualidade sensorial e na segurança alimentar da bebida do café. Além disso, a comunidade de microrganismos dos cafezais são os principais agentes de fertilidade do solo e da fermentação dos frutos que explica seu papel fundamental nos atributos sensoriais da bebida do café.

Ao longo de dez anos de pesquisa em diversos projetos, a parceria científica entre o Coffee Design (IFES campus Venda Nova do Imigrante) e o Laboratório de Micorriza (Departamento de Microbiologia, Universidade Federal de Viçosa) realizam diversos experimentos com coletas de amostras em diferentes regiões do país de solo e frutos de *Coffea arabica* e *Coffea canephora* a fim de mostrar os efeitos das mudanças climáticas sobre a diversidade microbiana do café e a importância dessa microbiota indígena sobre o desenvolvimento da planta, produção de frutos e qualidade química e sensorial da bebida do café. Essa microbiota foi analisada por técnicas moleculares e sequenciamento de última geração trazendo muitas novidades neste campo de pesquisa.

2. Condições climáticas, microrganismos e a bebida do café Conilon

O café é um produto singular, que possui características sensoriais que o distingue naturalmente das demais bebidas formuladas através de processos industriais. Nos últimos anos, uma série de fatores estão sendo investigados

no tocante à pré- e pós-colheita, focando diretamente nos processos e nas condições climáticas (*terroirs*) que podem garantir qualidade ao café. Assim, uma nova lacuna surge como base para a investigação científica, passa-se a investigar a condição de microbiota natural do cafeeiro em função da zona de cultivo, tendo em vista que os microrganismos presentes, podem aumentar a qualidade do produto em função de seus metabólitos na fase de processamento pós-colheita, através da fermentação espontânea e induzida.

Assim a avaliação do perfil microbiano e a influência da comunidade de leveduras de cerejas de *C. canephora* produzidas nos estados brasileiros ES, BA e RO sobre a qualidade sensorial da bebida do café foi avaliada e observou-se que essa comunidade modula a fermentação espontânea e, essa modulação influencia diretamente as características sensoriais da bebida (Novello 2025). Esse estudo revelou ainda que existem diferenças regionais significativas na diversidade e na composição taxonômica das leveduras do fruto de *C. canephora* em função da acidez e da fertilidade do solo. Além disso, as regiões com maior equitabilidade da comunidade de levedura apresentaram melhores notas sensoriais para acidez, equilíbrio e doçura da bebida (Novello 2025).

Os microrganismos do solo e os frutos do café desempenham papéis cruciais na qualidade sensorial da bebida, influenciando diretamente os aspectos aromáticos, gustativos e visuais da xícara (Filete et al., 2025; Pereira et al., 2021). Além disso, a diversidade de microrganismos no solo pode afetar a biodiversidade de compostos voláteis presentes nos grãos de café (Pereira & Moreira, 2021). Esses compostos, por sua vez, são os responsáveis pelos aromas e sabores característicos de cada tipo de café (Filete et al., 2021). Algumas cepas de bactérias podem produzir ácidos que influenciam o perfil ácido do café, enquanto leveduras podem contribuir para notas de sabor mais doces ou florais (Debona et al., 2025; Pereira et al., 2021).

O solo e frutos do café conilon apresentam diferentes microbiomas a depender da safra, sugerindo que os membros e a estrutura das comunidades microbianas são influenciados por fatores ambientais (tipo de solo, temperatura e umidade do solo) específicas de cada região e ano de produção (Tabela 1). Assim, a qualidade sensorial do café é um reflexo de uma rede de fatores biológicos e ambientais, com destaque para os microrganismos do solo e os frutos. O equilíbrio microbiano no solo favorece o desenvolvimento saudável das plantas e, conseqüentemente, a produção de frutos com características favoráveis para a fabricação de um café de qualidade. Segundo Veloso et al. (2020 e 2023), a interação complexa entre os microrganismos e os frutos durante o cultivo e a produção de café pode ser um dos principais impulsionadores para alcançar uma produção de alta qualidade. Além disso, a interação entre plantas e microrganismos assume importância crítica, com micróbios específicos assumindo papéis essenciais no crescimento da planta do café, no desenvolvimento do fruto e, subsequentemente, na qualidade do fruto (Gomes et al., 2023 e 2024).

Além das variações das condições climáticas, outros fatores de cultivo e processamento podem ter influenciado na nota sensorial do café conilon de uma safra a outra. Houve uma variação dos descritores sensoriais da bebida de café conilon em função do ano safra, altitude de plantio e método de processamento pós-colheita (Figura 1). Em 2021, todos os cafés produzidos na altitude de 514 m tiveram notas sensoriais próximas a 80 pontos independente do processamento pós-colheita. Em 2022, apenas o café de processamento natural manteve a nota sensorial em 80 pontos. Na altitude mediana, em 2021 havia apenas dois cafés com notas próximas a 80 pontos após a processamento pós colheita washed e fermentação com leveduras. Na safra de 2022, a nota sensorial do café de 714 m teve um aumento com o processamento washed. As notas dos cafés conilon de 822 m também reduziram da safra de 2021 para 2022. Além disso, as maiores notas sensoriais

da bebida de café conilon foram observadas na colheita da safra 2021 independentemente do método de fermentação (Figura 1). Esse resultado reforça o efeito das variações climáticas e das fermentações sobre os descritores sensoriais da bebida do café. Há também uma variação dos descritores sensoriais da bebida de café conilon em função do ano safra, altitude de plantio e método de processamento pós-colheita (Figura 1). Em 2021, todos os cafés produzidos na altitude de 514 m tiveram notas sensoriais próximas a 80 pontos independente do processamento pós-colheita. Em 2022, apenas o café de processamento natural manteve a nota sensorial em 80 pontos. Na altitude mediana, em 2021 tinha apenas dois cafés com notas próximas a 80 pontos após a processamento pós colheita washed e fermentação com leveduras. Na safra de 2022, a nota sensorial do café de 714 m teve um aumento com o processamento washed. As notas dos cafés conilon de 822 m também reduziram da safra de 2021 para 2022.

A fermentação com levedura foi o único processamento pós-colheita que produziu café com notas próximas a 80 pontos em 2021 independente da altitude de plantio (Figura 1). Esse resultado mostra a importância da seleção de microrganismos específicos para fermentação do café conilon. Por outro lado, apenas no café produzido em 822 m na safra de 2022, o processamento natural não conseguiu produzir bebida de café conilon de 80 pontos. Esse resultado mostra a importância da diversidade microbiana indígenas do café para fermentação de frutos e produção de bebidas de café com alta notas sensoriais. Além disso, a variação das notas sensoriais devido ao ano safra pode ser devido às variações edafoclimáticas da região de cultivo (Tabela 1, figura 1). A busca de informações científicas sobre a redução dos descritores sensoriais frente a mudanças climáticas continua sendo um foco importante nas pesquisas.

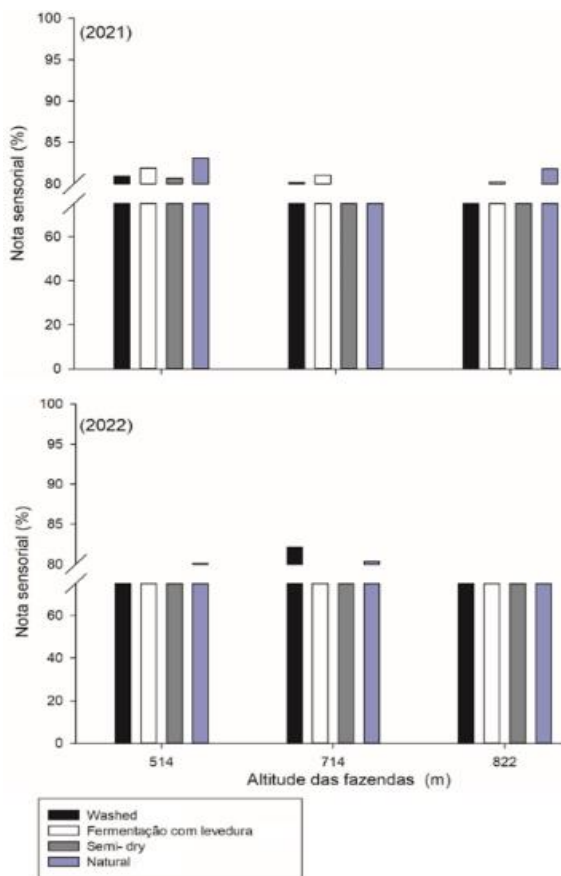


Figura 1. Nota sensorial de café conilon cultivados em diferentes altitudes (514, 714 e 822) e processamentos pós-colheita (*Washed*, fermentação com levedura, *semi-dry* e *natural*) nas safras 2021 e 2022.

As notas sensoriais foram diferentes entre os processamentos pós-colheita e ano (Figura 1). As maiores notas sensoriais foram na colheita da safra 2021 independentemente do método de fermentação. Esse resultado mostra o efeito das variações climáticas sobre os descritores sensoriais da bebida do café. Nos anos de 2020 e 2021, foram observadas alterações na redução do regime de chuvas nas regiões de cultivo de café do estado. A

pontuação sensorial depende do local de cultivo, manejos e métodos de processamento (da Silva et al., 2023). A pontuação do café conilon teve variação de 77 a 83 pontos em função da propriedade de cultivo e do método de processamento pós-colheita. No café conilon essa maior nota foi com processamento natural. Esses resultados mostram a importância do método de processamento pós-colheita para intensificar as notas sensoriais do café. Nota-se também a importância das condições edafoclimáticas nas notas sensoriais uma vez que as propriedades de localização geográfica distintas apresentaram diferenças nos atributos sensoriais nas safras avaliadas (Figura 1). Assim, esses resultados também são importantes para compreender como as mudanças climáticas observadas a cada ano podem ter um impacto na qualidade sensorial do café.

O plantio de *C. canephora* em diferentes tipos de solo, cambissolo e nitossolo, também apresentaram diferença no perfil sensorial da bebida (tabela 1, figura 1). Outros estudos também têm mostrado que o tipo de solo e a altitude tem influência positiva sobre a qualidade sensorial da bebida do café (Soares Ferreira et al., 2022; da Silva Oliveira et al., 2021; Gamonal et al., 2017). Diferentes perfis químicos e sensoriais da bebida de café produzidos por grãos de diferentes altitudes de plantio (da Silva Oliveira et al., 2021, Pinheiro et al., 2019). Assim, altas variações dos fatores climáticos sobre as lavouras de *C. canephora* nas safras de 2021 e 2022 tiveram fortes impactos sobre a produção do café, nos parâmetros fisiológicos dos grãos e na qualidade sensorial da bebida do café (Figura 1). Além disso, o monitoramento do tipo de solo e altitude para o plantio de *C. canephora* é importante para a qualidade sensorial da bebida do café.

A diversidade bacteriana do solo de *Coffea canephora* influência na nutrição e no desenvolvimento vegetal

A diversidade da comunidade de bactérias nos frutos do café contribui para a fermentação dos frutos e para a qualidade sensorial da bebida. Análise

in silico utilizando o banco de sequência genética pelo sequenciamento de última geração do DNA dos frutos das safras de 2020 a 2022 mostrou a presença de uma diversidade bacteriana funcional no solo de *C. canephora* com uma diferença significativa na flutuação da população bacteriana ano após ano (Figura 2) nos cafezais de diferentes altitudes de plantio. Essa flutuação pode ser devido às variações das condições climáticas ou fatores de cultivo, a exemplo da aplicação de fertilizantes.

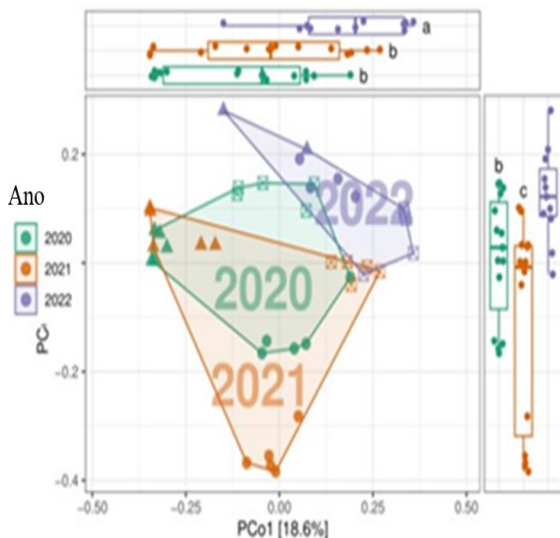


Figura 2. Perfil da diversidade beta do solo de *Coffea canephora* ao longo de 3 anos (2020, 2021 e 2022) de estudo.

O solo cultivado com *C. canephora* abriga uma ampla diversidade de bactérias com potencial de uso biotecnológico (Figura 3). A cada ano, a comunidade bacteriana sofre alterações em sua composição (Figura 3). Além disso, algumas bactérias se apresentam mais associadas a algumas propriedades do que com outras.

Uma maior presença de grupos bacterianos com potencial biotecnológico no ano de 2020 que 2022, como as bactérias fixadoras de

nitrogênio (BFN) da ordem Rhizobiales, da família Beijerinckiaceae e do gênero *Methylobacterium* e *Methylobacterium* foi observado (Figura 4). Assim, o café conilon abriga populações microbianas nativas que tem potencial de aumentar a saúde da lavoura devido às BFNs que são capazes de aumentar as entradas de nitrogênio na lavoura (Figuras 2 e 4). Dessa forma o manejo do solo deve ser realizado de modo a potencializar o desenvolvimento desses microrganismos benéficos. Essas bactérias são fundamentais para fertilidade do solo e disponibilidade de nitrogênio para plantas, além de produzir fatores de crescimento vegetal e compostos antimicrobianos para controle de fitopatógenos na rizosfera (Guimarães, 2025). Além disso, a predição *in silico* da diversidade BFN em sequência genômica obtidas no solo de dez lavouras de *Coffea arabica* e *C. canephora* por sequenciamento de última geração mostraram que as BFNs fazem parte da microbiota do solo do café e as espécies de *Rhizobium multihospitium*, *Rhizobium mesosinicum*, *Xanthobacteraceae* sp. e *Bradyrhizobium* sp. podem ser considerados como componentes da microbiota *core* da rizosfera do cafeeiro uma vez que essas espécies estavam presentes em todas as amostras do solo de café (Bullergahn et al., 2024). Nesse estudo, o DNA microbiano do solo foi extraído, amplificado por PCR e sequenciado na plataforma Illumina Miseq. A predição de BFN após o sequenciamento foi realizada com o programa PICRUSt2. Os autores mostraram também que a diversidade de BFN no solo de *C. canephora* é influenciada pela altitude e pelos atributos químicos do solo.

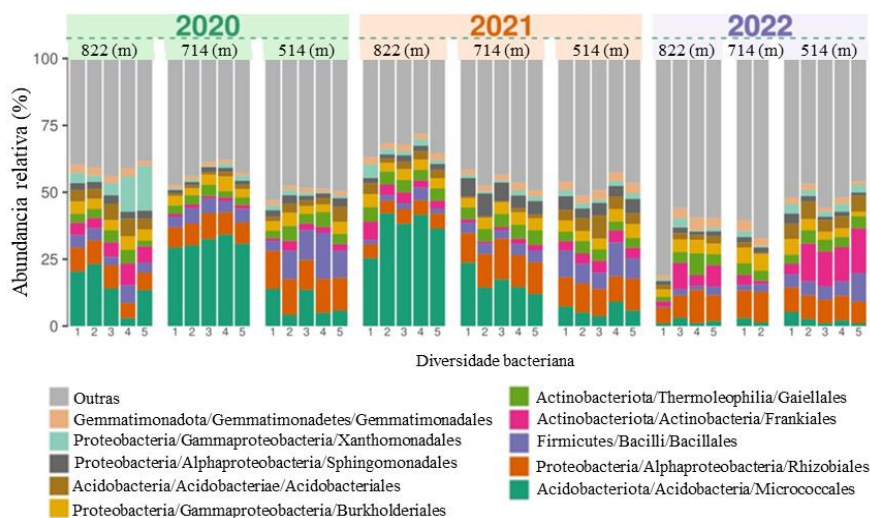


Figura 3. Diversidade bacteriana do solo de *Coffea canephora* ao longo de 3 anos (2020, 2021 e 2022) de estudo em diferentes solos (tabela 1) e altitudes (514, 714 e 822 m).

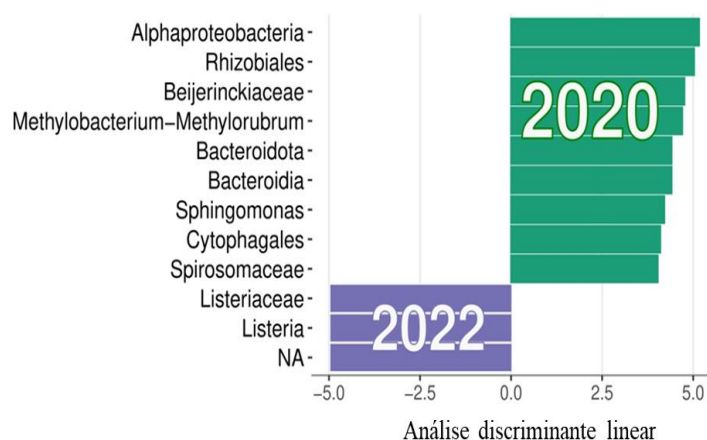


Figura 4. Bactérias associadas ao solo de *C. canephora* em cada ano de cultivo. Resultado baseado em análise discriminante linear do tamanho do efeito

4. Há uma diversidade de fungos micorrízicos na rizosfera da planta de café conilon que tem um papel fundamental na obtenção de água e nutriente e proteção contra patógenos

Os fungos micorrízicos foram negligenciados durante muito tempo devido a fertilização química do solo e falta de informações científicas sobre a presença deles na rizosfera da planta de café. Entretanto, os estudos da diversidade de fungos micorrízicos têm mostrado que a planta de café apresenta uma alta dependência da associação micorrízica para seu desenvolvimento vegetal e formação de frutos (Prates Júnior et al., 2025).

As amostragens de solo de plantio de café conilon em diferentes altitudes e período têm mostrado quantidade de esporos de FMAs no solo deste café a presença de uma grande quantidade de esporos (Figura 5). Esse número de esporos tem variação em função do período de amostragem (Figura 5A) e altitude de plantio (Figura 5B). A maior quantidade de esporos foi observada na amostragem do ano de 2022 (Figura 5A). Nesse mesmo período de amostragem também foi observado a redução do número de BNF associadas ao conilon (Figura 4). Esses resultados mostram uma sucessão de microrganismos benéficos associados ao café em diferentes períodos. O número de esporos de FMAs também aumenta com a altitude de plantio (Figura 5B). Esse aumento era esperado uma vez que os FMAs auxiliam a planta na absorção de água que em altitude maior está menos disponível no solo. Além disso, esses fungos contribuem para consolidação da Agricultura regenerativa uma vez que são componentes do ecossistema do solo e desempenham várias funções biológicas para reestruturação dos parâmetros físico e químicos do solo e para o crescimento vegetal de culturas nativas e agrícolas.

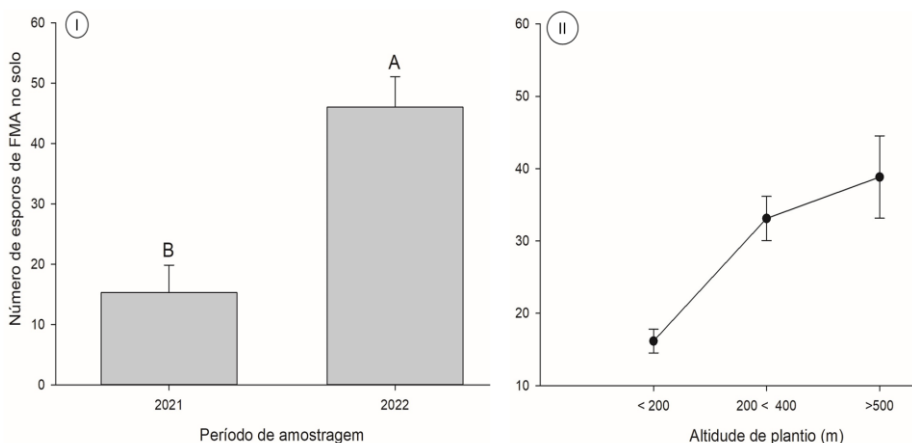


Figura 5. Número de esporos de Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMAs) no solo de café conilon em diferentes períodos de amostragem (I) e altitude de plantio (II). As letras maiúsculas sobre a barras mostram diferenças significativas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

O maior crescimento em altura e a sobrevivência de plantas em campo, quando associado ao maior número de espécies de FMA, pode ocorrer como resultado de práticas de manejo como sombreamento (Moreira, 2025; Ardito et al., 2017). Prates Júnior et al. (2025) mostraram em uma revisão bibliográfica que os FMA em plantas de café podem aumentar a resistência e a proteção contra pragas/patógenos, estimulando a produção de metabólitos secundários, reduzindo a necessidade de pesticidas e melhorando a qualidade das bebidas de café. Além disso, as funções ecológicas dos FMAs são diversas e ocorrem devido ao longo processo evolutivo com as plantas (Prates Júnior et al., 2025). Esses autores acrescentam que os FMAs também recrutam outros microrganismos benéficos do solo e exploram um volume maior de solo, aumentando a absorção de água e nutrientes, como o fósforo. Assim, os FMAs associam-se com as raízes das plantas, incluindo o cafeeiro, estabelecendo uma relação simbiótica denominada de micorriza e exercem

atividades ecológicas chave para o funcionamento e manejo de sistemas agrícolas (Souza et al., 2010). Estes fungos aumentam a área de absorção de nutrientes de baixa mobilidade e de água no solo devido à dimensão das hifas (Ardito et al., 2017; Smith & Read 2008). A aquisição e transferência de nutrientes, como o aumento da tolerância ao estresse abiótico, redução do estresse abiótico e supressão de doenças são outros benefícios dos FMAs para saúde do solo e das plantas (Millar & Bennet 2016).

Portanto, os estudos têm apontado que o uso de FMAs no cultivo de café é alternativa viável e promissora para redução do uso de defensivos agrícolas, enfrentamento das mudanças climáticas, em especial ao déficit hídrico e a sustentabilidade ambiental das lavouras de café.

Referências

- Ardito, A.C.S.; Saggin-Júnior, O.J., Fors, R.O.; da Costa, R.S.C.; da Silva, E.M.R. Arbuscular mycorrhizal fungi selection for *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner clonal cultivar conilon 'BRS OURO PRETO. **Coffee Science**, v.12, n.4, p. 486-497. 2017.
- Bullergahn, V.B.; Menezes, K.M.S.; Veloso, T.G.R.; da Luz, J.M.R.; Castanheira, L.F.; Pereira, L.L.; da Silva, M.C.S. Diversity of potential nitrogen-fixing bacteria from rhizosphere of the *Coffea arabica* L. and *Coffea canephora* L. **3 Biotech**, v. 14, p. 27. 2024.
- Da Silva Oliveira, E.C.; da Luz, J.M.R.; De Castro, M.G.; Filgueiras, P.R.; Guarçoni, R.C.; De Castro, E.V.R.; da Silva, M.C.S.; Pereira, L.L. Chemical and sensory discrimination of coffee: impacts of the planting altitude and fermentation. **European Food Research and Technology**, v. 247, p. 659–669. 2021.
- da Silva, M.C.S.; Veloso, T.G.R.; Brioschi Junior, D.; Bullergahn, V.B.; da Luz, J.M.R.; Menezes, K.M.S.; Guarçoni, R.C.; Kasuya, M.C.M.; Pereira, L.L. Bacterial community and sensory quality from coffee are affected along fermentation under carbonic maceration. **Food Chemistry Advances**, v. 3, p. 100554. 2023.
- Debona, D. G.; Lyrio, M.V.V.; Da Luz, J.M.R.; Frinhani, R.Q.; Araújo, B.Q.; Da Silva Oliveira, E.C.; Agnoletti, B.Z.; Coura, M.R.; Pereira, L.L.; De Castro, E.V.R. Comprehensive evaluation of volatile compounds and sensory profiles of coffee throughout the roasting process. **Food Chemistry**, v. 1, p. 143586-1, 2025.
- Filete, C.A.; Gomes, W.S.; da Luz, J.M.R.; Moreira, T.R.; Oliveira, E.C.S.; Simmer, M.M.B.; Guarçoni, R.C.; Santos, J.M.M.; Pereira, L.L. Chemical and sensorial profile of cultivars fermented by different post-harvest processing methods. **International Journal of Food Sciences and Nutrition**, v. 75, p. 1-11. 2025.

- Gamonal, L. E.; Vallejos-Torres, G.; López, L. A.. Sensory analysis of four cultivares of coffee (*Coffea arabica* L.), grown at different altitudes in the San Martin region - Peru. *Ciência Rural*, v.47, n.9, p. e20160882. 2017.
- Globo. **Globo lança campanha para alertar os impactos da crise climática nos alimentos**. <https://somos.globo.com/novidades/noticia/globo-lanca-campanha-para-alertar-os-impactos-da-crise-climatica-nos-alimentos.ghtml>. 2025
- Gomes, W.S.; Pereira, L.L.; Da Luz, J.M.R.; Da Silva Oliveira, E. C.; Guarçoni, R.C.; Moreira, T.R.; Filete, C.A.; Moreli, A.P.; Partelli, F.L. Preliminary study of variation in quality of fermented *Coffea canephora* genotypes using sensory assessment and mid-infrared spectroscopy. *European Food Research and Technology*, v. 250, p. 2935–2946, 2023.
- Gomes, W.S.; Pereira, L.L.; Luz JMR.; da Silva, M.C.S.; Veloso, T. G. R.; Partelli, F.L. Exploring the Microbiome of Coffee Plants: Implications for Coffee Quality and Production. **Food Research International**, v.179, p. 113972, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.113972>
- Guimarães, C.V. **Predição metagenômica, isolamento e caracterização de bactérias diazotróficas do solo de café arábica**. 2025. Dissertação em Microbiologia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa – MG, 2025, 90p.
- Incapar. **Cafeicultura - Café Conilon**. <https://incaper.es.gov.br/cafeicultura-conilon>. 2025.
- Martins, E.O.; Menezes, K.M.S.; Veloso, T. G. R.; Luz, J.M.R.; Pereira, L.L.; da Silva, M.C.S. Arbuscular mycorrhizal fungi community in coffee cultivation under different agroforestry management systems in the Maciço de Baturité region, Brazil. **Agroecology and Sustainable Food Systems**, v. 49, p. 1-19, 2024.
- Martins, E.O.; Luz, J.M.R.; Oliveira, E.C.S.; Guarçoni, R.C.; Moreira, T.R.; Moreli, A.P.; Siqueira, E.A.; da Silva, M.C.S.; Costa, M.R.G.F.; Pereira, L.L. Chemical profile and sensory perception of coffee produced in agroforestry management. **European Food Research and Technology**, v. 249, p. 1479–1489. 2023. 7
- Millar, N.S.; Bennett, A.E.. Stressed out symbiotes: hypotheses for the influence of abiotic stress on arbuscular mycorrhizal fungi. **Oecologia**, v. 182, p. 625–642. 2016.
- Moreira, M.F. **Diversidade de microrganismos em áreas de manejo convencional e agroecológico de cafeeiro arábica**. 2025. Dissertação em Agroecologia). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo. Alegre – ES, 2024, 50p.
- Novello, J.S. **Microbioma do *Coffea canephora* em diferentes arranjos produtivos no Brasil**. Dissertação em Agroecologia). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo. Alegre – ES, 2025, 85p.
- Pereira, L. L.; Moreira, T. R. **Quality Determinants In Coffee Production**. 1. ed. New York: Springer Nature,. v. 1. 709p. 2021
- Pereira, L.L.; Júnior, D.B.; de Sousa, L.H.B.P.; Gomes, W.S.; Cardoso, W.S.; Guarçoni, R.C.; ten Caten, C.S. Relationship between coffee processing and fermentation. In: Pereira, L. L.; Moreira, T. R. **Quality Determinants In Coffee Production**. 1. ed. New York: Springer Nature,. v. 1. 709p. 2021

- Pinheiro, C. A.; Pereira, L. L.; Fiorese, D. B. ; Oliveira, D. S.; Osorio, V. M.; Silva, J. A.; Pereira, U. A.; Ferrao, M. A. G.; Riva-Souza, E. M.; Fonseca, A. F. A.; Pinheiro, P. F. Physico-chemical properties and sensory profile of *Coffea canephora* genotypes in high-altitudes. **Australian Journal of Crop Science** (Online), v. 12, p. 2046-2052, 2019.
- Prates Júnior, P.; da Luz, J.M.R.; Moreira, S.L.S.; Moreira, B.C.; Gomes, L.C.; Fernandes, R.B.A.; Kasuya, M.C.M.; da Silva, M.C.S. Arbuscular mycorrhizal fungi and coffee: A review of functional and hidden links between microorganisms, soil, plant, and humans. **Ecological Frontiers**, v. 1, p. 1, 2025.
- Smith, S. E.; Read, J. D. **Mycorrhizal symbiosis**, 3th ed. London: Academic Press, 800p. 2008
- Soares Ferreira, D.; Oliveira, M.E.S.; Ribeiro, W.R.; Filete, C.A.; Castanheira, D. T.; Rocha, B.C.P.; Moreli, A.P.; Oliveira, E.C.S.; Guarçoni, R.C.; Partelli, F.L.; Pereira, L.L. Association of Altitude and Solar Radiation to Understand Coffee Quality. **Agronomy-Basel**, v. 12, p. 1885, 2022.
- Souza, D. A.; Alixandre, R.D.; Alixandre, F.T.; Krohling, C.A.; Fornazier, M.J.; Guarçoni, R.C.; Lima, P.A.M.; Macette, H.A.; Holtz, F.G.; Catem, D.S. B. Qualidade sensorial da bebida de cultivares de *Coffea arabica* L. em função do processamento pós-colheita: Qualidade sensorial de bebidas de café de cultivares de *Coffea arabica* L. afetada pelo processamento pós-colheita. **Revista Brasileira de Pesquisa Animal e Ambiental**, v. 6, n. 2, pág. 962-968, 2023.
- Veloso, T. G. R.; Da Silva, M. D. C. S.; Cardoso, W. S.; Guarçoni, R. C.; Kasuya, M. C. M.; Pereira, L. L. Effects of environmental factors on microbiota of fruits and soil of *Coffea arabica* in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 14692, 2020.
- Veloso, T. G. R.; Da Silva, M. D. C. S.; Moreira, T. R.; Da Luz, J. M. R.; Moreli, A. P.; Kasuya, M. C. M.; Pereira, L. L. Microbiomes associated with *Coffea arabica* and *Coffea canephora* in four different floristic domains of Brazil. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 18477, 2023.

14° SIMPÓSIO DO PRODUTOR DE *Conilon* ADAPTAÇÃO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Realização:



Co-realização:



PATROCINADORES



ISBN: 978-65-01-74134-5

CD



9 786501 741345