

ORGANIZADOR:
Maurício Novaes Souza

Tópicos em cafeicultura. Volume VI

Cafeicultura Agroecológica II



ORGANIZADOR:
Maurício Novaes Souza

Tópicos em cafeicultura. Volume VI

Cafeicultura Agroecológica II

Canoas
2026



Organizador
Maurício Novaes Souza



Equipe editorial

Editor Chefe

Prof. Dr. Luis Guillermo Ramírez Mérida
Universidad de Carabobo (UC), Venezuela.

Comitê Editorial

Prof^a. MSc. Alba Morón de Salim
Universidad de Carabobo (UC), Venezuela.

Prof^a. Dr^a. Carla Rosane Barboza Mendonça
Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Brasil.

Prof^a. Dr^a. Caroline Dellinghausen Borges
Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Brasil.

Prof^a. Dr^a. Flávia Michelin Dalla Nora
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Brasil.

Dr^a. Ihana Aguiar Severo
Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil.

Dr. Joceli Augusto Gross
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Brasil.

Dr. José Bruno Malaquias
Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil.

Dr. Luis Manuel Hernández García
Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), Brasil.

Prof^a. Dr^a. Neila Silvia Pereira dos Santos Richards
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Brasil.

Prof. Dr. Rafael Fernández da Silva
Universidad de Carabobo (UC), Venezuela.

Prof. Dr. Richard Alberto Rodríguez Padrón
Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC), Uruguay.

Prof^a. Dr^a. Tassiane dos Santos Ferrão
Instituto Federal Farroupilha (IFFar), Brasil.

ESTUDOS DE CASO:

Agroecologia e agricultura orgânica: alicerces da cafeicultura sustentável

Déficit hídrico e fenologia reprodutiva do cafeeiro: da ecofisiologia da planta à construção de sistemas produtivos resilientes

Biocarvão em sistemas cafeeiros: efeitos nos atributos do solo e na sustentabilidade produtiva

Economia circular e manejo sustentável de resíduos na cadeia produtiva do café

Segurança do trabalho e sustentabilidade na cafeicultura: contribuições da agroecologia para ambientes produtivos mais seguros

Tópicos em cafeicultura Cafeicultura Agroecológica Volume VI

© 2026 Mérida Publishers

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-46-6>

Organizador

Maurício Novaes Souza

Revisão ortográfica, textual e linguística:

Maurício Novaes Souza

Apoio à redação e ao aprimoramento textual:

Maurício Novaes Souza, com auxílio de ferramentas de inteligência artificial generativa (ChatGPT/OpenAI e Gemini/Google DeepMind).

Adaptação da capa e desenho gráfico

José Luis Guzmán

Fotos da capa

Maurício Novaes Souza

Fotos da contracapa

Jozimara Teixeira de Souza



Canoas - RS - Brasil

contact@meridapublishers.com

www.meridapublishers.com

Todos os direitos autorais pertencem a Mérida Publishers. A reprodução total ou parcial dos trabalhos publicados, é permitida desde que sejam atribuídos créditos aos autores.



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

T674 Tópicos em cafeicultura vol. VI [livro eletrônico] : cafeicultura agroecológica II / Organizador Maurício Novaes Souza. – 1. ed. – Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026. – (Tópicos em Cafeicultura ; v. 6)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia.

ISBN 978-65-84548-46-6

1. Cafeicultura. 2. Agricultura. I. Souza, Maurício Novaes. II. Série.

CDD 630

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

Dedicatória

Ao longo da vida acadêmica, aprendemos que a construção do conhecimento acontece por meio do estudo, da pesquisa e, principalmente, das pessoas com quem compartilhamos essa trajetória.

A turma de Mestrado e Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Ifes Campus de Alegre, em 2026, foi uma experiência muito especial. Ao longo desse percurso, construímos não apenas conhecimento científico, mas também parcerias, aprendizados e relações de respeito mútuo.

As aulas, orientações, atividades de campo, projetos, capítulos e artigos desenvolvidos coletivamente demonstraram a força do trabalho colaborativo e o compromisso de cada um com a pesquisa e com a Agroecologia. A produção científica alcançada é motivo de satisfação, mas igualmente importante foi a oportunidade de aprender e crescer juntos ao longo desse processo.

Guardo com carinho nossa última aula presencial, marcada por momentos de partilha, reflexão e gratidão. Em uma fase da vida em que a aposentadoria já se aproxima, essa experiência reforçou minha convicção de que a educação continua sendo uma das mais importantes ferramentas de transformação social.

Hoje realizamos nossa última atividade conjunta desta disciplina com uma visita à Comunidade de Feliz Lembrança. A experiência foi excelente e reforçou a importância da aprendizagem construída a partir da vivência e do diálogo com as comunidades.

Na aula anterior, entreguei a cada um dos alunos desta turma uma pequena gema ou um fragmento de rocha como símbolo do intemperismo, processo natural que transforma a rocha em solo ao longo do tempo. Assim como a rocha se transforma lentamente até dar origem ao solo, nossa formação acadêmica também se constrói de maneira gradual, por meio das experiências, dos desafios, das reflexões e dos aprendizados compartilhados.

Por tudo isso, dedico esta obra à Turma 2026 do Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Ifes Campus de Alegre.

Gratidão!

Professor Maurício Novaes

Guarapari, junho de 2026.

Prefácio

A cafeicultura atravessa um momento singular de sua história. Em um cenário marcado pelas mudanças climáticas, pela crescente exigência dos consumidores e pela necessidade de sistemas produtivos mais resilientes, a busca por modelos capazes de conciliar produtividade, qualidade e sustentabilidade deixaram de ser uma opção para tornar-se uma necessidade.

Nesse contexto, a cafeicultura agroecológica vive um período de forte protagonismo. Impulsionada pela crescente demanda por produtos rastreáveis, pela valorização dos serviços ecossistêmicos e pela busca por sistemas agrícolas mais sustentáveis, ela consolida-se como uma das principais alternativas para enfrentar os desafios contemporâneos da produção de café. Entretanto, a transição para modelos regenerativos ou a manutenção de sistemas já estabelecidos exige muito mais do que a simples substituição de insumos convencionais por alternativas biológicas.

Os desafios são numerosos. A crescente instabilidade climática tem provocado alterações na dinâmica hídrica e térmica das lavouras, favorecendo floradas desuniformes, intensificando o estresse fisiológico das plantas e ampliando a necessidade de estratégias de adaptação. Ao mesmo tempo, o manejo nutricional em sistemas de base ecológica demanda planejamento cuidadoso para sincronizar a ciclagem de nutrientes com as fases de maior exigência do cafeeiro, tornando o solo e a matéria orgânica elementos centrais da sustentabilidade produtiva.

Somam-se a isso os desafios fitossanitários associados ao controle ecológico de pragas e doenças, especialmente em um contexto de elevação das temperaturas médias. A construção de paisagens agrícolas mais biodiversas, com corredores ecológicos, sistemas agroflorestais e maior integração entre os componentes do agroecossistema, surge como uma alternativa promissora, embora seus benefícios exijam tempo para se consolidar. Paralelamente, as exigências relacionadas à certificação, rastreabilidade e conformidade ambiental criam novas oportunidades de mercado, mas também impõem custos e responsabilidades adicionais aos produtores.

Além das questões ambientais e climáticas, os acontecimentos recentes no cenário internacional evidenciaram outro desafio relevante para a agricultura contemporânea: a dependência de insumos externos. Conflitos geopolíticos, interrupções logísticas e oscilações nos mercados globais provocaram aumentos expressivos nos preços de fertilizantes, combustíveis e outros insumos agrícolas, reduzindo as margens de lucro dos produtores e ampliando a vulnerabilidade dos sistemas produtivos. Em muitos casos, o problema deixou de ser apenas o custo elevado, passando a incluir a própria disponibilidade desses produtos em momentos críticos do ciclo agrícola.

Nesse contexto, os princípios agroecológicos assumem importância ainda maior. Estratégias como a produção de bioinsumos na própria propriedade, a compostagem, a adubação verde, o uso de microrganismos benéficos e a rotação contribuem para reduzir a dependência de insumos externos e fortalecer a autonomia dos agricultores. Além dos benefícios econômicos associados à diminuição dos custos de produção, essas práticas favorecem a fertilidade do solo, a conservação ambiental e a estabilidade produtiva ao longo do tempo, ampliando a capacidade das propriedades rurais de enfrentar cenários de incerteza e instabilidade.

Apesar dessas dificuldades, a agroecologia oferece uma perspectiva diferenciada. Em vez de buscar a simplificação dos sistemas produtivos, propõe compreender e utilizar os processos ecológicos como aliados da produção agrícola. Solos biologicamente ativos, cobertura permanente, diversidade vegetal, conservação da água e fortalecimento da biodiversidade tornam-se componentes estratégicos para aumentar a resiliência das lavouras e reduzir sua vulnerabilidade frente aos eventos climáticos extremos.

Os capítulos reunidos neste volume abordam diferentes dimensões dessa transformação. Temas como conservação do solo e da água, sistemas agroflorestais, biodiversidade funcional, qualidade do café, polinização, manejo ecológico, biocarvão, mudanças climáticas e inovação tecnológica são discutidos sob uma perspectiva integradora, evidenciando que a sustentabilidade não resulta de ações isoladas, mas da interação entre múltiplos componentes do agroecossistema.

Ao longo das últimas décadas, a ciência tem demonstrado que os sistemas agrícolas mais resilientes são justamente aqueles que conseguem incorporar diversidade biológica, eficiência ecológica e capacidade de adaptação. Na cafeicultura, isso significa compreender que a qualidade do café não depende apenas da genética ou da tecnologia empregada, mas também da fertilidade do solo, da disponibilidade de água, da atividade biológica, da paisagem e do cuidado dedicado ao ambiente de produção.

Ao mesmo tempo, observa-se uma crescente valorização de cafés produzidos em bases sustentáveis. Consumidores de diferentes partes do mundo passaram a reconhecer que cada grão carrega uma história que vai muito além da bebida. Aspectos relacionados à origem, à conservação ambiental, às condições de trabalho e à identidade territorial tornaram-se elementos cada vez mais relevantes na construção de valor e na diferenciação dos produtos.

Nesse cenário, a agroecologia oferece contribuições que ultrapassam os limites da produção agrícola. Ela fortalece a autonomia dos agricultores, promove a conservação dos recursos naturais, estimula a inovação baseada nos processos ecológicos e contribui para a construção de sistemas alimentares mais justos e equilibrados.

Este livro nasce desse entendimento. Mais do que apresentar conceitos ou resultados de pesquisa, busca estimular reflexões sobre os caminhos possíveis para uma cafeicultura capaz de produzir riqueza sem comprometer a integridade dos ecossistemas e o bem-estar das futuras gerações.

Na epígrafe desta obra compartilho uma breve reflexão que sintetiza, de certa forma, o espírito deste volume:

“O café nasce da terra, mas sua história é escrita pelo tempo. O mesmo tempo que transforma rochas em solo, sementes em lavouras e aprendizado em sabedoria.”

A frase procura destacar que os processos mais importantes da natureza e da formação humana não acontecem de maneira instantânea. O solo resulta de longos processos de transformação física, química e biológica; as lavouras são construídas pelo trabalho acumulado de sucessivas gerações de agricultores; e o conhecimento se desenvolve por meio da experiência, da observação e da

partilha de saberes. Da mesma forma, a transição para sistemas agrícolas mais sustentáveis exige tempo, dedicação, paciência e aprendizado contínuo.

Que os capítulos deste livro possam contribuir para esse processo de construção coletiva, fortalecendo o diálogo entre ciência, prática agrícola e compromisso com a sustentabilidade.

Professor Maurício Novaes

Guarapari, junho de 2026.

EPÍGRAFE

O café nasce da terra, mas sua história é escrita pelo tempo.

O mesmo tempo que transforma rochas em solo, sementes em lavouras e
aprendizado em sabedoria.

Maurício Novaes Souza

Apresentação

Este livro dá continuidade a iniciativas desenvolvidas no âmbito do Curso Superior de Tecnologia em Cafeicultura, sendo agora ampliadas e aprofundadas por discentes e orientados da Pós-Graduação em Agroecologia, tanto nos níveis *Lato Sensu* quanto *Stricto Sensu*, do Ifes Campus de Alegre.

Os capítulos aqui reunidos refletem a diversidade de temas, experiências, pesquisas e reflexões que vêm sendo construídas ao longo dos últimos anos, sempre com o propósito de fortalecer uma cafeicultura comprometida com a qualidade, a sustentabilidade e a valorização dos territórios produtores.

Ao reunir contribuições de estudantes, pesquisadores e profissionais vinculados à Agroecologia e à Cafeicultura, esta obra busca fortalecer o diálogo entre ciência, prática agrícola e desenvolvimento sustentável, oferecendo subsídios para pesquisadores, extensionistas, estudantes e produtores interessados nos desafios e nas oportunidades da cafeicultura contemporânea.

O Volume I do livro **“Tópicos de Cafeicultura”**, intitulado **“Produção de Café Orgânico: práticas agroecológicas conservacionistas e novas tecnologias disponíveis ao produtor rural”**, foi elaborado a partir do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) do meu orientado, João Marcos Verly Oliveira da Silva. A publicação foi muito bem recebida e superou às nossas propostas e expectativas – foi traduzido para 11 idiomas e comercializado pela empresa *Amazon*, em todo o mundo. Os trabalhos produzidos nas disciplinas, bem como os TCCs e as dissertações, ganharam visibilidade por intermédio dessa parceria com os acadêmicos, contribuindo para o aumento das publicações do nosso programa, o que é uma exigência fundamental dos órgãos de fomento e financiamento de pesquisas.

Esse trabalho (ISBN: 978-620-2-80826-2), composto de cinco (5) capítulos, foi publicado pela editora *Meidrum Street, Mauricius*: Novas Edições Acadêmicas, 2021, com os seguintes capítulos:

Capítulo I. Educação ambiental na cafeicultura

Capítulo II. Legislação para a produção de orgânicos

Capítulo III. Permacultura na agricultura

Capítulo IV. Sistemas agroflorestais (SAFs) e a cafeicultura

Capítulo V. Cafeicultura agroecológica: sugestões para pesquisa.

A obra está disponível para consulta em:

<https://www.morebooks.shop/shop-ui/shop/product/978-620-2-80826-2>

O Volume II da coleção **Tópicos de Cafeicultura**, intitulado **Cafeicultura em Região de Topografia Acidentada e Práticas de Conservação e Recuperação do Solo**, teve como base o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) de minha orientada Andresa Carolina Mendes Pinheiro.

A obra (ISBN 9786584548053), publicada em 2022 pela Mérida Publishers, em Canoas (RS), é composta por cinco capítulos:

Capítulo I. A importância do café para o mundo e o Brasil.

Capítulo II. Práticas de conservação e recuperação do solo.

Capítulo III. Barraginhas (caixas secas e/ou bacias de contenção).

Capítulo IV. Estudo de caso: barraginhas e a produtividade do cafeeiro conilon no Ifes Campus de Alegre.

Capítulo V. Barraginhas: multifunções.

A obra está disponível para consulta em:

<https://www.meridapublishers.com/crta-esp/>

O Volume III da coleção **Tópicos de Cafeicultura**, intitulado **Manual do Viveiricultor: Produção de Mudas de Café**, foi desenvolvido a partir das atividades realizadas com estudantes da disciplina Viveiricultura, do Curso Superior de Tecnologia em Cafeicultura do Ifes Campus de Alegre, entre os anos

de 2016 e 2020. A etapa final de elaboração da obra contou com a colaboração dos mestrandos em Agroecologia Marciano Kaulz e Mariana Rodrigues Almeida.

A obra (ISBN 978-65-84548-07-7), composta por doze capítulos, foi publicada em 2022 pela Mérida Publishers, em Canoas (RS).

A obra está disponível para consulta em:

<https://www.meridapublishers.com/mmc/mmc.pdf>

O **Volume IV da coleção Tópicos de Cafeicultura, intitulado Cafés Especiais**, mantém o propósito dos volumes anteriores de reunir conhecimentos técnicos e científicos voltados ao planejamento e à condução sustentável das lavouras cafeeiras. A obra enfatiza a produção de cafés especiais, destacando a importância da qualidade, da valorização dos territórios produtores e da adoção de práticas agroecológicas capazes de conciliar produtividade, conservação ambiental e sustentabilidade.

Publicado pela Mérida Publishers, o volume é composto por oito capítulos, que abordam os seguintes temas:

Capítulo I. Cultura do café no Brasil e a produção de cafés especiais.

Capítulo II. O café como destaque para o agronegócio brasileiro e capixaba.

Capítulo III. Do conceito de *terroir* à prática da indicação geográfica: uma revisão sistemática.

Capítulo IV. Produção de cafés especiais: tendências.

Capítulo V. Características e cuidados na produção de cafés especiais.

Capítulo VI. Influência da altitude da lavoura e da posição dos frutos na planta sobre os aspectos granulométricos e sensoriais do café arábica.

Capítulo VII. Análise física e sensorial do café.

Capítulo VIII. Agroecologia e a produção de cafés especiais.

A obra está disponível para consulta em:

<https://www.meridapublishers.com/ce4/>

O Volume V da coleção **Tópicos de Cafeicultura**, intitulado **Cafeicultura Agroecológica**, mantém o propósito de reunir conhecimentos técnicos e científicos voltados ao planejamento e à condução sustentável das lavouras cafeeiras. A obra destaca a importância da agroecologia como estratégia para promover a resiliência dos sistemas produtivos, a qualidade dos cafés, a conservação dos recursos naturais e a sustentabilidade econômica, social e ambiental da atividade cafeeira.

Publicado pela Mérida Publishers, o volume é composto por dez capítulos, que abordam os seguintes temas:

Capítulo I. Mudanças climáticas e a vulnerabilidade da cafeicultura no Espírito Santo: riscos, impactos e estratégias de adaptação.

Capítulo II. Três faces da sustentabilidade rural: agroecologia, agricultura orgânica e transição agroecológica.

Capítulo III. Adubação verde: práticas tradicionais e inovações para uma agricultura de baixo impacto.

Capítulo IV. Bioindicadores e controle ecológico: estratégias sustentáveis no manejo de pragas e doenças agrícolas.

Capítulo V. Monitoramento da broca-do-café com armadilhas atrativas: estratégia para manejo sustentável.

Capítulo VI. Bokashi: a revolução dos adubos orgânicos na agricultura sustentável.

Capítulo VII. Transição agroecológica e qualidade: a nova dinâmica da cafeicultura de *Coffea canephora* no Espírito Santo.

Capítulo VIII. Vantagens da sustentabilidade na produção de café conilon: perspectivas ambientais e de mercado.

Capítulo IX. Desafios e perspectivas da agricultura sustentável: impactos da agricultura convencional e práticas agroecológicas para a recuperação do solo e da produção de café.

Capítulo X. Café, solo e saber: a educação ambiental como instrumento de sustentabilidade na agroecologia.

A obra está disponível para consulta em:

<https://www.meridapublishers.com/ca5/>

O Volume VI **da coleção Tópicos de Cafeicultura**, intitulado **Cafeicultura Agroecológica II**, dá continuidade às discussões desenvolvidas nos volumes anteriores, reunindo contribuições voltadas ao planejamento, ao manejo e à sustentabilidade dos sistemas cafeeiros. Mais do que apresentar tecnologias e práticas de cultivo, esta obra busca compreender a cafeicultura como um agroecossistema complexo, no qual fatores ecológicos, econômicos, sociais e culturais interagem de forma dinâmica e interdependente.

A obra enfatiza a produção de cafés de qualidade associada à conservação dos recursos naturais, à valorização dos territórios produtores e ao fortalecimento da resiliência dos sistemas agrícolas diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas. Nesse contexto, são discutidas estratégias fundamentadas nos princípios da agroecologia e da agricultura regenerativa, contemplando aspectos relacionados ao manejo do solo e da água, à biodiversidade, à qualidade dos grãos e às inovações tecnológicas aplicadas à cafeicultura.

Publicado pela Mérida Publishers, o Volume VI é composto por cinco capítulos que abordam diferentes dimensões da cafeicultura agroecológica contemporânea, reunindo contribuições de pesquisadores, estudantes e profissionais comprometidos com a construção de sistemas produtivos mais resilientes, eficientes e ambientalmente responsáveis.

O Capítulo I, **“Agroecologia e agricultura orgânica: alicerces da cafeicultura sustentável”**, apresenta os fundamentos da agroecologia e sua relação com a agricultura orgânica, destacando princípios como conservação do

solo e da água, manejo ecológico de pragas e diversificação produtiva. O capítulo evidencia como essas abordagens contribuem para a construção de sistemas cafeeiros mais resilientes e sustentáveis.

O Capítulo II, **“Déficit hídrico e fenologia reprodutiva do cafeeiro: da ecofisiologia da planta à construção de sistemas produtivos resilientes”**, analisa os efeitos da disponibilidade hídrica sobre a fenologia reprodutiva do cafeeiro e a qualidade dos grãos. Também discute estratégias de adaptação às mudanças climáticas, com ênfase no manejo conservacionista, irrigação e sistemas agroecológicos.

O Capítulo III, **“Biocarvão em sistemas cafeeiros: efeitos nos atributos do solo e na sustentabilidade produtiva”**, aborda o potencial do biocarvão para melhorar os atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Destaca ainda seu papel no aproveitamento de resíduos agrícolas, no sequestro de carbono e na promoção da sustentabilidade dos sistemas cafeeiros.

O Capítulo IV, **“Economia circular e manejo sustentável de resíduos na cadeia produtiva do café”**, discute alternativas para o aproveitamento de resíduos gerados pela cafeicultura, incluindo compostagem, biofertilizantes, biochar e geração de energia. O capítulo evidencia a importância dessas práticas para a redução de impactos ambientais e o fortalecimento da economia circular.

O Capítulo V, **“Segurança do trabalho e sustentabilidade na cafeicultura: contribuições da agroecologia para ambientes produtivos mais seguros”**, apresenta os principais riscos ocupacionais presentes na atividade cafeeira e discute estratégias de prevenção baseadas na inovação tecnológica e nos princípios agroecológicos. O capítulo destaca a promoção da saúde dos trabalhadores como componente essencial da sustentabilidade da cafeicultura.

A obra está disponível para consulta em:

<https://www.meridapublishers.com/ca6/>

Nas **considerações finais**, destaca-se que os desafios ambientais, climáticos, econômicos e sociais enfrentados pela cafeicultura contemporânea

reforçam a necessidade de modelos produtivos mais sustentáveis e resilientes. Nesse contexto, a agroecologia emerge como uma abordagem capaz de integrar conservação ambiental, viabilidade econômica, inovação tecnológica e valorização dos saberes locais, contribuindo para a construção de sistemas cafeeiros mais equilibrados e adaptados às novas demandas da sociedade.

Os capítulos reunidos nesta obra abordam temas estratégicos para essa transição, incluindo os fundamentos da agroecologia e da agricultura orgânica, os impactos do déficit hídrico sobre a fenologia do cafeeiro, o potencial do biocarvão para a melhoria da qualidade do solo, a economia circular aplicada ao aproveitamento de resíduos da cadeia produtiva do café e a promoção da segurança e da saúde dos trabalhadores rurais. Em conjunto, esses temas evidenciam que a sustentabilidade da cafeicultura depende da integração entre manejo ecológico, conservação dos recursos naturais, inovação tecnológica e valorização do capital humano.

Dessa forma, este livro busca contribuir para o fortalecimento de uma cafeicultura capaz de produzir com qualidade, respeitando os limites ecológicos dos agroecossistemas e promovendo melhores condições de vida para agricultores e trabalhadores rurais. Mais do que uma alternativa produtiva, a cafeicultura agroecológica apresenta-se como um caminho viável para enfrentar os desafios contemporâneos da produção agrícola, conciliando produtividade, conservação ambiental, segurança no trabalho e responsabilidade social.

Em síntese, a construção de sistemas cafeeiros mais sustentáveis depende da articulação entre ciência, experiência prática e compromisso coletivo. A agroecologia, associada a estratégias de adaptação climática, manejo sustentável dos recursos naturais e inovação no campo, oferece bases sólidas para a formação de uma cafeicultura mais resiliente, regenerativa e preparada para os desafios do futuro.

Professor Maurício Novaes

Guarapari, junho de 2026.

Autores

Alex Justino Zacarias

Doutorando e Mestre em Agroecologia pelo Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Instituto Federal do Espírito Santo - Campus de Alegre. Caixa Postal 47, CEP: 29.500-000, Alegre, ES. E-mail: alexjustino12@gmail.com

Ana Terra Bravim dos Santos

Engenheira Agrônoma pela Universidade Federal de Viçosa, Doutoranda em agroecologia pelo Programa de Pós Graduação em Agroecologia do Ifes campus de Alegre, Caixa Postal 47, CEP 29.500-000, Alegre, ES. E-mail: anaterabravim@hotmail.com

Atanásio Alves do Amaral

Professor Titular do Instituto Federal do Espírito Santo Campus de Alegre, Caixa Postal 47, CEP: 29.500-000. Alegre, ES. E-mail: atanasio.amaral@ifes.edu.br.

Carla Sardinha de Oliveira

Licenciada em Química pela Universidade Federal do Espírito Santo, mestra em Ensino de Química pelo Programa de Pós-Graduação em Ensino de Química da UFRJ *campus* fundão, doutoranda em Agroquímica pelo Programa de Pós-Graduação em Agroquímica da UFES *campus* Alegre, rua Gerson Passos Martins, nº 210, Bairro Acaiaca. CEP: 29.285-000, Piúma, ES. E-mail: carlasardinhadeoliveira99@gmail.com

Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira

Professor do Instituto Federal do Espírito Santo e do Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Campus de Alegre, Caixa Postal 47, CEP: 29.500-000, Alegre - ES. E-mail: carlos.oliveira@ifes.edu.br

Dâmaris de Souza Guimarães

Agrônoma e Mestranda em Agroecologia pelo Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Ifes - Campus de Alegre, Caixa Postal 47, CEP: 29.500-000. Alegre, ES. E-mail: damaris.guimaraes@ifes.edu.br

Dayane Vitória Silva Mello

Licenciada em Ciências Biológicas e Mestranda em Agroecologia pelo Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Ifes. Alameda José da Costa Picoto, Vila Viana, Alegre, ES. CEP: 29.500-000. Alegre, ES. E-mail: daymellovitoria@gmail.com.

Déborah Sampaio de Almeida

Doutoranda em Agroecologia pelo Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Ifes - Campus de Alegre, Caixa Postal 47, CEP: 29.500-000. Alegre, ES. E-mail: deborahsampaio12@gmail.com

Erivelto Oliveira de Souza

Doutorando em Agroecologia pelo Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Instituto Federal do Espírito Santo - Campus de Alegre. Caixa Postal 47, CEP: 29.500- 000, Alegre, ES. E-mail: velto3032@gmail.com.

Fernanda Barcelos de Paula

Tecnóloga em Cafeicultura e Mestranda em Agroecologia pelo Instituto Federal do Espírito Santo do campus de Alegre - Caixa Postal 47. CEP: 29.500-000. Alegre - ES. E-mail: fernandabpaula.cafeicultura@gmail.com

Gilmara da Silva Rangel

Doutoranda e Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Instituto Federal do Espírito Santo *campus* de Alegre. Caixa Postal 16. CEP: 29.500-000, Alegre, ES. E-mail: rangel.gilmara@gmail.com

Isabela Berbert da Guia

Bióloga pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), mestra em Educação pela mesma instituição, doutoranda em Agroecologia pelo Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Ifes - Campus de Alegre, Caixa Postal 47, CEP: 29.500-000. Alegre, ES. E-mail: ibguia@gmail.com.

Jozimara Teixeira de Souza

Doutoranda em Agroecologia pelo Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Ifes Campus de Alegre, Caixa Postal 47, CEP: 29.500-000. Alegre, ES. E-mail: jozimarateixeira19@gmail.com.

Karenn Zavarize Bermond

Bacharel em Engenharia Civil pela Faculdade do Futuro (2021), Tecnóloga em Cafeicultura pelo Ifes - *Campus* de Alegre (2025) e Mestranda em Agroecologia pelo Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Ifes - *Campus* de Alegre, Caixa Postal 47, CEP: 29.500-000, Alegre, ES. E-mail: karennbermond@gmail.com

Leonard Campos Avellar Machado

Engenheiro Agrônomo pela Universidade Federal do Espírito Santo, Mestre e Doutorando em Agroecologia pelo Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Ifes Campus Alegre. Caixa Postal 47, CEP: 29.500-000, Alegre, ES. E-mail:

leonardcamachado@gmail.com

Ludmila Lisbôa Porto

Estudante do curso de Tecnologia em Cafeicultura do Instituto Federal do Espírito Santo do campus de Alegre - Caixa Postal 47. CEP: 29.500-000. Alegre - ES. E-mail: ludmilalporto@gmail.com

Magno do Carmo Parajara

Doutorando em Agroecologia pelo Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Instituto Federal do Espírito Santo - Campus de Alegre. CEP: 29.520-000, Alegre-Rive, ES. E-mail: magnocp1@hotmail.com

Mateus Madeira da Silva

Estudante do curso de Tecnologia em Cafeicultura do Instituto Federal do Espírito Santo do campus de Alegre - Caixa Postal 47. CEP: 29.500-000. Alegre - ES. E-mail: mateussilvamadeira129@gmail.com

Maurício Novaes Souza

Professor Titular do Instituto Federal do Espírito Santo e do Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Campus de Alegre - Caixa Postal 47, CEP: 29.500-000. Alegre, ES. E-mail: mauricios.novaes@ifes.edu.br

Otacílio José Passos Rangel

Professor Titular do Instituto Federal do Espírito Santo e do Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Campus de Alegre, Caixa Postal 47, CEP: 29.500-000, Alegre - ES. E-mail: otaciliorangel@gmail.com

Regiane Carla Bolzan Carvalho

Doutoranda e Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Instituto Federal do Espírito Santo *campus* de Alegre. Caixa Postal 16. CEP: 29.520-000, Alegre, ES. E-mail: regianecbc@gmail.com

Rony Mendes Rodrigues

Mestrando em Agroecologia pelo Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Instituto Federal do Espírito Santo - Campus de Alegre. Caixa Postal 47, CEP: 29.500- 000, Alegre, ES. E-mail: ronymendes194@gmail.com.

Salomão Martins de Carvalho Júnior

Bacharel em engenharia de agrimensura, Licenciado em Matemática, especialista em ensino religioso, Mestre em engenharia civil e doutorando em

Agroecologia pelo Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Ifes Campus de Alegre, Caixa Postal 47, CEP 29.500-000, Alegre, ES. E-mail: salomao.junior@ifes.edu.br.

Sara de Oliveira Olimpio

Licenciada em Ciências Biológicas pelo Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Alegre, mestranda em agroecologia pelo Programa de Pós Graduação em Agroecologia do IFES Campus Alegre, Caixa postal 47, CEP 29.500-000, Alegre, ES. E-mail: saraolimpio72@gmail.com.

Silvia Aline Bérghamo Xavier

Doutoranda, Mestre e Pós-graduada em Agroecologia pelo Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Instituto Federal do Espírito Santo Campus de Alegre. Caixa Postal 47, CEP: 29.500-000, Alegre, ES. E-mail: silviaaline.xavier@gmail.com.

Thaís de Souza Pastor

Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Instituto Federal do Espírito Santo campus de Alegre. Caixa Postal 16. CEP: 29.500-000, Alegre, ES. E-mail: thaispastor1994@gmail.com.

Tamiris da Silva Gumiere

Licenciada em Ciências Biológicas pela Universidade Federal do Espírito Santo, Mestranda em agroecologia pelo Programa de Pós Graduação em Agroecologia do Ifes Campus Alegre. CEP: 29.500-000, Alegre, ES. E-mail: tamigumiere@gmail.com.

Willian Moreira da Costa

Mestrando e Pós-graduado em Agroecologia pelo Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Instituto Federal do Espírito Santo - Campus de Alegre. Caixa Postal 47, CEP: 29.500-000, Alegre, ES. E-mail: willianbiologo@hotmail.com.

Índice

CAPÍTULO 1..... 26

Agroecologia e agricultura orgânica: alicerces da cafeicultura sustentável

Maurício Novaes Souza, Willian Moreira da Costa, Tamiris da Silva Gumiere, Leonard Campos Avellar Machado, Silvia Aline Bérغامo Xavier, Dayane Vitoria Silva Mello, Ana Terra Bravim dos Santos, Déborah Sampaio de Almeida, Jozimara Teixeira de Souza, Isabela Berbert da Guia, Fernanda Barcelos de Paula, Atanásio Alves do Amaral, Salomão Martins de Carvalho Júnior, Erivelto Oliveira de Souza, Carla Sardinha de Oliveira

CAPÍTULO 2..... 54

Déficit hídrico e fenologia reprodutiva do cafeeiro: da ecofisiologia da planta à construção de sistemas produtivos resilientes

Fernanda Barcelos de Paula, Ludmila Lisbôa Porto, Magno do Carmo Parajara, Jozimara Teixeira de Souza, Déborah Sampaio de Almeida, Willian Moreira da Costa, Regiane Carla Bolzan Carvalho, Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira, Atanásio Alves do Amaral, Maurício Novaes Souza

CAPÍTULO 3..... 101

Biocarvão em sistemas cafeeiros: efeitos nos atributos do solo e na sustentabilidade produtiva

Dâmaris de Souza Guimarães, Alex Justino Zacarias, Déborah Sampaio de Almeida, Magno do Carmo Parajara, Otacílio José Passos Rangel, Fernanda Barcelos de Paula, Willian Moreira da Costa, Atanásio Alves do Amaral, Maurício Novaes Souza

CAPÍTULO 4..... 141

Economia circular e manejo sustentável de resíduos na cadeia produtiva do café

Karenn Zavarize Bermond, Dayane Vitória Silva Mello, Rony Mendes Rodrigues, Sara de Oliveira Olimpio, Isabela Berbert da Guia, Tamiris da Silva Gumiere, Willian Moreira da Costa, Maurício Novaes Souza

CAPÍTULO 5	191
-------------------------	------------

Segurança do trabalho e sustentabilidade na cafeicultura: contribuições da agroecologia para ambientes produtivos mais seguros

Mateus Madeira da Silva, Dayane Vitoria Silva Mello, Thaís de Souza Pastor, Gilmara da Silva Rangel, Willian Moreira da Costa, Maurício Novaes Souza

CONSIDERAÇÕES FINAIS	229
-----------------------------------	------------

CAPÍTULO 1

Agroecologia e agricultura orgânica: alicerces da cafeicultura sustentável

Maurício Novaes Souza, Willian Moreira da Costa, Tamiris da Silva Gumiere, Leonard Campos Avellar Machado, Silvia Aline Bérghamo Xavier, Dayane Vitoria Silva Mello, Ana Terra Bravim dos Santos, Déborah Sampaio de Almeida, Jozimara Teixeira de Souza, Isabela Berbert da Guia, Fernanda Barcelos de Paula, Atanásio Alves do Amaral, Salomão Martins de Carvalho Júnior, Erivelto Oliveira de Souza, Carla Sardinha de Oliveira

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-46-6.c1>

Resumo

A agroecologia constitui uma abordagem científica, prática e social voltada à construção de sistemas agrícolas sustentáveis, fundamentada na integração entre conhecimentos científicos e saberes tradicionais. Baseada em uma perspectiva sistêmica, considera os agroecossistemas em sua totalidade, abrangendo os processos produtivos, ecológicos, sociais, econômicos e culturais que compõem os sistemas agroalimentares. Em contraposição ao modelo convencional de produção, caracterizado pela elevada dependência de insumos externos e pela simplificação ecológica, a agroecologia propõe a valorização da biodiversidade, da ciclagem de nutrientes, dos recursos locais e da autonomia dos agricultores. A agricultura orgânica, embora compartilhe diversos princípios ambientais com a agroecologia, distingue-se por sua base normativa e pelos mecanismos de certificação que regulamentam a produção e a comercialização dos alimentos. Ao longo deste capítulo, são discutidos os fundamentos conceituais da agroecologia, suas interfaces com a agricultura orgânica, as práticas de manejo sustentável, a importância da agrobiodiversidade, os desafios relacionados à segurança sanitária, os mecanismos de comercialização e os processos de transição agroecológica. Destaca-se ainda a relevância desses princípios para a cafeicultura agroecológica, especialmente no que se refere à conservação do solo e da água, ao manejo ecológico de pragas e doenças, à diversificação produtiva e à melhoria da qualidade dos cafés. Os conceitos ora apresentados constituem a base teórica para a compreensão dos temas abordados nos capítulos subsequentes desta obra. Conclui-se que a agroecologia representa um caminho promissor para o fortalecimento de sistemas agrícolas resilientes, ambientalmente responsáveis, economicamente viáveis e socialmente justos.

Palavras-chave: Biodiversidade funcional. Serviços ecossistêmicos. Conservação do solo. Agricultura familiar. Resiliência socioambiental. Manejo ecológico.

1. Introdução

A agroecologia se configura como um campo interdisciplinar que integra dimensões científicas, práticas e sociais na construção de sistemas agrícolas sustentáveis. Fundamentada na articulação de conhecimentos oriundos da agronomia, ecologia, sociologia, economia e áreas afins, essa abordagem adota uma perspectiva sistêmica, compreendendo os agroecossistemas em sua totalidade funcional, desde a produção de insumos até o consumo final (Odum, 1988; Gliessman, 2001; Wezel *et al.*, 2009). Nesse contexto, o agricultor deixa de ser apenas executor de técnicas e passa a ser reconhecido como sujeito ativo na geração e na validação do conhecimento, valorizando-se, portanto, os saberes tradicionais e locais (Leff, 2001; Altieri, 2004; Caporal; Costabeber, 2004; Souza, 2026b; Souza *et al.*, 2026d).

Sob o ponto de vista teórico, a agroecologia apoia-se no conceito de coevolução entre sociedade e natureza, propondo a reconfiguração dos sistemas produtivos diante das limitações impostas pelo modelo da Revolução Verde. Em oposição à simplificação ecológica e à dependência de insumos externos, busca-se promover a biodiversidade funcional, a ciclagem de nutrientes e o uso de recursos endógenos (Caporal; Costabeber, 2002; Altieri, 2012; Gliessman, 2015; Souza, 2026c). Essa perspectiva dialoga com os princípios do ecodesenvolvimento e da racionalidade ambiental, que defendem formas de produção compatíveis com os limites ecológicos dos ecossistemas (Leff, 2001; Sachs, 2002; Souza, 2026d).

A crítica ao modelo agrícola convencional também é reforçada por autores como Lutzenberger (1980) e Shiva (2003), que alertam para os impactos ambientais, sociais e econômicos decorrentes da homogeneização produtiva e da erosão da agrobiodiversidade. Em contraposição, a agroecologia estimula a diversificação dos sistemas produtivos, o fortalecimento da resiliência ecológica e a conservação dos recursos naturais (Primavesi, 2016; Costa, 2017; Souza, 2026b; Machado *et al.*, 2026).

A agricultura orgânica, por sua vez, caracteriza-se como um sistema de produção regulamentado, com base legal consolidada, que restringe o uso de insumos sintéticos e estabelece critérios técnicos para certificação e comercialização. Embora compartilhe princípios ambientais com a agroecologia,

sua aplicação pode, em determinados contextos, limitar-se à substituição de insumos, sem necessariamente promover transformações estruturais no sistema produtivo (Massariol *et al.*, 2025).

Dessa forma, a agroecologia se destaca por sua abordagem ampliada, incorporando dimensões sociais, culturais, econômicas e políticas. Ao valorizar a agrobiodiversidade, fortalecer a autonomia dos agricultores e incentivar circuitos curtos de comercialização, ela contribui para a construção de sistemas mais resilientes, equitativos e sustentáveis (Abramovay, 2003; Caporal; Costabeber, 2004; Souza *et al.*, 2025; Souza, 2026d; Machado *et al.*, 2026; Souza *et al.*, 2026).



Figura 1. Distinções conceituais e operacionais entre produção orgânica e sistema agroecológico. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Além disso, sua contribuição para o alcance dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável tem sido amplamente reconhecida, especialmente pela capacidade de integrar conservação ambiental, inclusão social e viabilidade econômica (Destefani *et al.*, 2025; Souza *et al.*, 2025; Souza, 2026c). Nesse sentido, a agroecologia constitui não apenas uma estratégia de produção agrícola, mas também um movimento científico, social e político voltado à construção de novos paradigmas de desenvolvimento rural (Wezel *et al.*, 2009;

Souza, 2026e). Nesse contexto, a Figura 1 apresenta uma síntese das principais dimensões constitutivas da agricultura orgânica e da agroecologia.

Embora frequentemente associadas e, por vezes, utilizadas como sinônimos, a agricultura orgânica e a agroecologia apresentam diferenças conceituais relevantes, particularmente no que se refere à abrangência de seus princípios e objetivos. Enquanto a agricultura orgânica possui forte base normativa e regulatória, a agroecologia incorpora dimensões ecológicas, sociais, culturais, econômicas e políticas, configurando-se como uma abordagem mais ampla de transformação dos sistemas agroalimentares.

Essa distinção torna-se especialmente relevante diante da crescente preocupação com os impactos ambientais, sociais e econômicos associados aos sistemas agrícolas convencionais. A degradação dos recursos naturais, as mudanças climáticas, a perda de biodiversidade e a crescente demanda por alimentos produzidos de forma sustentável têm impulsionado a busca por modelos alternativos de produção. Nesse contexto, a agroecologia e a agricultura orgânica emergem como importantes estratégias para conciliar produtividade, conservação ambiental e promoção da qualidade de vida (Figura 2).



Figura 2. Contraste entre a agricultura convencional e os sistemas agroecológicos sustentáveis. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (ChatGPT).

Diante desse cenário, este capítulo tem como objetivo apresentar os fundamentos teóricos da agroecologia e da agricultura orgânica, discutindo seus princípios, práticas, interfaces e desafios contemporâneos. Busca-se, ainda, evidenciar suas convergências e particularidades, fornecendo a base conceitual necessária para a compreensão dos capítulos subsequentes desta obra, dedicados à aplicação desses princípios no contexto da cafeicultura agroecológica.

2. Fundamentos da agroecologia: bases epistemológicas, abordagem sistêmica e coevolução socioecológica

A agroecologia constitui uma abordagem científica, prática e social orientada à construção de sistemas agrícolas sustentáveis, fundamentada na integração de múltiplos campos do conhecimento. Diferentemente de perspectivas reducionistas, essa abordagem articula contribuições da agronomia, ecologia, sociologia, antropologia, economia, ciência política e história, além de dialogar com princípios da física, especialmente no que se refere à eficiência energética e à dinâmica dos fluxos de matéria e energia nos agroecossistemas (Odum, 1988; Gliessman, 2001; Wezel *et al.*, 2009; Souza, 2026c).

Mais do que uma simples interface entre agronomia e ecologia, a agroecologia incorpora de forma estruturante os saberes tradicionais e locais, reconhecendo o agricultor como sujeito ativo na produção e na validação do conhecimento. Essa perspectiva reforça a necessidade de uma abordagem holística e sistêmica, na qual o sistema agroalimentar é compreendido em sua totalidade funcional, abrangendo o “antes da porteira” (produção de insumos e planejamento), o “dentro da porteira” (processos produtivos) e o “depois da porteira” (comercialização, distribuição e consumo) (Leff, 2001; Altieri, 2004; Caporal; Costabeber, 2004; Souza, 2026d).

No âmbito teórico, destaca-se o conceito de coevolução entre sociedade e natureza, segundo o qual os sistemas sociais e ecológicos se transformam de maneira interdependente ao longo do tempo. Entretanto, esse processo foi profundamente alterado com a intensificação da agricultura moderna,

especialmente a partir da Revolução Verde, que promoveu a simplificação dos agroecossistemas por meio da mecanização intensiva, da monocultura e do uso sistemático de insumos químicos. Tal modelo contribuiu para a redução da biodiversidade, o aumento da dependência de insumos externos e a intensificação dos impactos ambientais associados à atividade agrícola (Lutzenberger, 1980; Shiva, 2003; Altieri, 2012; Souza, 2026b).

Em resposta a esse modelo, a agroecologia propõe a reconfiguração dos sistemas produtivos com base na diversificação biológica, na ciclagem de nutrientes e na valorização de recursos endógenos, buscando maior equilíbrio ecológico, eficiência energética e resiliência socioambiental. Essa transformação demanda mudanças não apenas técnicas, mas também culturais, econômicas e institucionais, favorecendo processos de transição agroecológica capazes de reduzir a dependência de insumos externos e fortalecer a autonomia dos agricultores (Primavesi, 2016; Costa, 2017; Souza, 2026; Souza et al., 2026d) (Figura 3).



Figura 3. Transição agroecológica: reconfiguração dos sistemas produtivos para maior equilíbrio ecológico, autonomia e resiliência socioambiental. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (ChatGPT).

Conforme ilustrado na Figura 3, a transição agroecológica envolve transformações que extrapolam os aspectos estritamente técnicos da produção agrícola, abrangendo também dimensões ecológicas, sociais, econômicas e institucionais. Trata-se, portanto, de um paradigma que transcende a dimensão produtiva, contribuindo para a construção de sistemas agroalimentares mais sustentáveis, inclusivos e adaptados às realidades locais. Ao integrar conhecimentos científicos e populares, fortalecer a agrobiodiversidade e promover relações mais equilibradas entre sociedade e natureza, a agroecologia consolida-se como uma das principais estratégias para o desenvolvimento rural sustentável no século XXI (Sachs, 2002; Abramovay, 2003; Souza, 2026).

3. Agricultura orgânica: fundamentos conceituais, marco regulatório e limites operacionais

A agricultura orgânica configura-se como um sistema de produção agrícola regulamentado, baseado na exclusão do uso de agrotóxicos, fertilizantes sintéticos e organismos geneticamente modificados, priorizando a conservação dos recursos naturais, a promoção da biodiversidade e a proteção da saúde humana. Esse modelo fundamenta-se em princípios ecológicos que buscam manter o equilíbrio dos agroecossistemas, por meio do manejo sustentável do solo, da diversificação de culturas e do uso de insumos de origem natural (Altieri, 2012; Primavesi, 2016; Souza, 2026c).

No contexto brasileiro, a agricultura orgânica é regulamentada pela Lei nº 10.831/2003, complementada por um conjunto de normativas que definem critérios técnicos para a produção, o processamento, a certificação e a comercialização dos produtos orgânicos. A certificação constitui um requisito obrigatório, sendo fundamental para assegurar a conformidade do sistema produtivo e a credibilidade junto aos consumidores. Esse processo pode ocorrer por meio de organismos de avaliação da conformidade por auditoria ou por mecanismos participativos, como os Sistemas Participativos de Garantia (SPG) e as Organizações de Controle Social (OCS), que se destacam por fortalecer a participação coletiva, a transparência e o acesso de agricultores familiares aos mercados (Abramovay, 2003; Sardinha; Souza; Berilli, 2021; Motta *et al.*, 2025).

Do ponto de vista analítico, é importante reconhecer que a adoção de práticas orgânicas, embora represente um avanço significativo em relação ao modelo convencional, não garante, de forma isolada, a sustentabilidade plena dos sistemas agrícolas. Em determinadas situações, observa-se a reprodução de lógicas produtivas simplificadas, baseadas na substituição de insumos, sem a devida reestruturação ecológica e socioeconômica do sistema produtivo. Esse fenômeno evidencia que a simples eliminação de insumos sintéticos não assegura, necessariamente, a diversificação biológica, a autonomia produtiva ou a justiça social no meio rural (Massariol *et al.*, 2025; Souza, 2026).

Nesse sentido, a agricultura orgânica apresenta limites operacionais quando desvinculada de uma abordagem sistêmica mais ampla. A sustentabilidade dos agroecossistemas depende não apenas da substituição de práticas convencionais, mas também da reorganização das relações ecológicas, econômicas e sociais que estruturam os sistemas produtivos. Tal compreensão aproxima-se dos princípios defendidos pela agroecologia, que valoriza a diversidade funcional, a autonomia dos agricultores, a construção coletiva do conhecimento e a integração entre conservação ambiental e desenvolvimento rural (Caporal; Costabeber, 2004; Gliessman, 2015; Costa, 2017; Souza, 2026b).

Assim, a efetividade da agricultura orgânica em termos de sustentabilidade tende a ser potencializada quando articulada aos princípios da agroecologia, que incorporam dimensões sociais, culturais e políticas, promovendo transformações mais profundas nos sistemas agroalimentares. Nessa perspectiva, a transição para modelos produtivos sustentáveis requer mudanças estruturais que ultrapassem os limites técnicos da produção, envolvendo também processos de fortalecimento da agricultura familiar, ampliação da participação social e construção de sistemas alimentares mais resilientes e equitativos (Sachs, 2002; Souza, 2026; Souza *et al.*, 2025).

4. Agroecologia e agricultura orgânica: distinções conceituais e pontos de convergência

Embora compartilhem princípios fundamentais, como a busca pela sustentabilidade, a conservação ambiental e a redução da dependência de insumos químicos sintéticos, agroecologia e agricultura orgânica constituem

abordagens distintas no campo das ciências agrárias e dos sistemas agroalimentares (Altieri, 2012; Massariol *et al.*, 2025).

A agricultura orgânica caracteriza-se por sua base normativa e regulatória, sendo estruturada a partir de legislações e protocolos técnicos que estabelecem critérios claros para produção, certificação e comercialização. Essa padronização assegura a qualidade dos produtos e a confiança dos consumidores, porém, em muitos casos, limita-se à substituição de insumos convencionais por alternativas permitidas, sem necessariamente promover mudanças estruturais no modelo produtivo (Destefani *et al.*, 2025; Massariol *et al.*, 2025; Souza, 2026).

Por outro lado, a agroecologia apresenta uma abordagem mais abrangente e sistêmica, incorporando, além das dimensões ecológicas, aspectos sociais, culturais, econômicos, políticos e éticos. Trata-se de um paradigma que propõe a reconfiguração dos agroecossistemas com base na diversificação biológica, na valorização dos saberes locais e na construção de relações mais equilibradas entre sociedade e natureza (Leff, 2001; Caporal; Costabeber, 2004; Gliessman, 2015). Essas diferenças e os principais pontos de convergência entre a agricultura orgânica e a agroecologia são sintetizados na Figura 4.



Figura 4. Distinções conceituais e pontos de convergência entre agricultura orgânica e agroecologia. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (ChatGPT).

Conforme ilustrado na Figura 4, a agroecologia transcende os limites da produção agrícola, abrangendo temas como soberania alimentar, fortalecimento da agricultura familiar, desenvolvimento territorial sustentável, justiça social e conservação da agrobiodiversidade. Dessa forma, não se restringe a um conjunto de técnicas produtivas, mas constitui uma proposta científica e sociopolítica voltada à transformação dos sistemas agroalimentares contemporâneos (Wezel *et al.*, 2009; Costa, 2017; Souza *et al.*, 2025).

Nesse sentido, é possível afirmar que sistemas produtivos podem ser simultaneamente orgânicos e agroecológicos, quando atendem tanto aos critérios normativos quanto aos princípios sistêmicos da agroecologia. No entanto, nem todo sistema orgânico pode ser considerado agroecológico, especialmente quando não há transformação efetiva das relações ecológicas, econômicas e sociais que estruturam o processo produtivo. A simples substituição de insumos sintéticos por insumos permitidos, embora represente um avanço ambiental relevante, não garante, por si só, a construção de sistemas resilientes e sustentáveis (Altieri, 2012; Massariol *et al.*, 2025; Souza, 2026).

Assim, enquanto a agricultura orgânica representa um avanço importante na redução dos impactos ambientais associados à agricultura convencional, a agroecologia consolida-se como uma proposta mais profunda e transformadora, orientada à construção de sistemas agrícolas resilientes, socialmente justos e ecologicamente equilibrados. Ao integrar princípios ecológicos, participação social, valorização dos saberes tradicionais e fortalecimento da autonomia dos agricultores, a agroecologia amplia o alcance da sustentabilidade e contribui para a construção de novos paradigmas de desenvolvimento rural (Sachs, 2002; Abramovay, 2003; Caporal; Costabeber, 2004; Souza, 2026).

5. Práticas agroecológicas e manejo sustentável: estratégias ecológicas para a regeneração dos agroecossistemas

Os sistemas agroecológicos fundamentam-se na utilização de recursos endógenos e na intensificação dos processos ecológicos, especialmente aqueles relacionados à ciclagem de nutrientes, à dinâmica biológica do solo e à eficiência dos fluxos de energia nos agroecossistemas. Essa abordagem reduz

a dependência de insumos externos e fortalece a autonomia produtiva, ao mesmo tempo em que promove maior estabilidade, biodiversidade e resiliência socioambiental (Odum; Barrett, 2007; Gliessman, 2015; Souza; Magalhães et al., 2025) (Figura 5).



Figura 5. Dinâmica ecológica dos agroecossistemas: biodiversidade, sistema radicular e microbiota do solo. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Conforme ilustrado na Figura 5, a manutenção da vida no solo constitui um dos pilares dos sistemas agroecológicos, uma vez que a interação entre raízes, microrganismos, fauna edáfica e matéria orgânica sustenta processos essenciais como a ciclagem de nutrientes, a formação da estrutura do solo, a retenção de água e a disponibilidade de nutrientes para as plantas.

Dentre as principais práticas agroecológicas, destaca-se o uso de sementes crioulas, que por sua adaptação às condições edafoclimáticas locais, desempenham papel estratégico na conservação da agrobiodiversidade, na manutenção da variabilidade genética e no fortalecimento da soberania alimentar. A adubação verde, com ênfase no uso de leguminosas, contribui para a fixação biológica de nitrogênio, melhoria da estrutura do solo, incremento da matéria orgânica e estímulo à atividade biológica edáfica (Altieri, 2012; Paula et al., 2025; Machado et al., 2026).

A compostagem e a utilização de esterco devidamente curtidos constituem práticas essenciais para a manutenção da fertilidade do solo, promovendo a disponibilização gradual de nutrientes e o estímulo à atividade microbiana. Nesse contexto, o uso de insumos biológicos, como o Bokashi e os microrganismos eficientes (EM), intensifica os processos de decomposição e mineralização, favorecendo o equilíbrio microbiológico e a regeneração dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo (Primavesi, 2016; Souza, 2018; Gomes *et al.*, 2022; Besteti *et al.*, 2025; Egidio; Souza, 2025; Paula *et al.*, 2025).

Adicionalmente, a implantação de biofábricas para produção de biofertilizantes, extratos vegetais e outros insumos agroecológicos representa uma estratégia relevante para a redução dos custos de produção, fortalecimento da autonomia dos agricultores e ampliação da sustentabilidade econômica dos sistemas produtivos. Essas iniciativas contribuem para a valorização dos recursos locais e para a construção de sistemas menos dependentes de insumos industrializados (Caporal; Costabeber, 2004; Souza, 2026).

No manejo fitossanitário, observa-se uma mudança paradigmática: o controle de pragas deixa de ser baseado na eliminação de organismos e passa a priorizar o equilíbrio ecológico do sistema. Assim, práticas como diversificação de culturas, consórcios, manutenção de habitats naturais e manejo da biodiversidade funcional contribuem para a regulação ecológica de pragas e doenças, favorecendo a atuação de inimigos naturais e reduzindo a necessidade de intervenções externas (Altieri, 2004; Gomes *et al.*, 2025) (Figura 6).

Conforme ilustrado na Figura 6, a sustentabilidade dos agroecossistemas resulta da interação dinâmica entre componentes físicos, biológicos, sociais e econômicos, de modo que alterações em um desses elementos repercutem sobre todo o sistema produtivo.

A qualidade biológica do solo também assume papel central nos sistemas agroecológicos, uma vez que organismos como minhocas, artrópodes, fungos, bactérias e demais componentes da macrofauna e microbiota participam ativamente da decomposição da matéria orgânica, da ciclagem de nutrientes e da formação da estrutura do solo. Dessa forma, esses organismos podem ser considerados importantes bioindicadores da sustentabilidade e do equilíbrio ecológico dos agroecossistemas (Ricklefs; Relyea, 2018; Sá *et al.*, 2025).

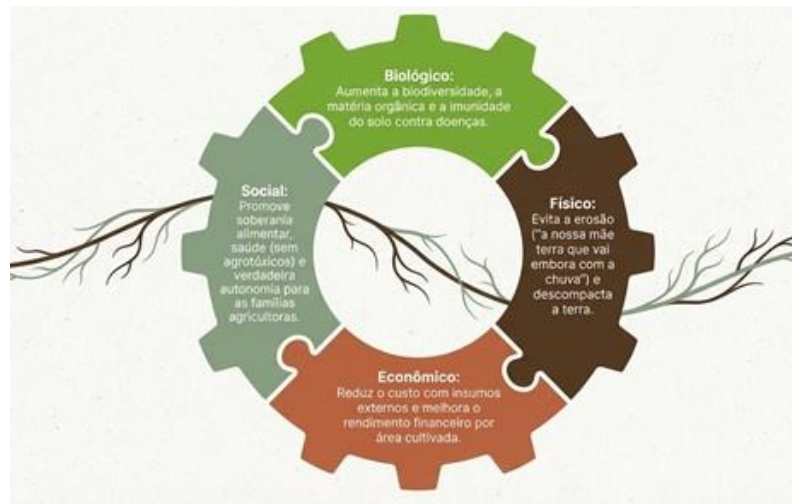


Figura 6. Visão sistêmica dos agroecossistemas: interação entre os componentes físicos, biológicos, sociais e econômicos. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Práticas associadas à agricultura sintrópica e aos sistemas agroflorestais complementam esse conjunto de estratégias ao promoverem elevada diversidade funcional, intensificação dos processos ecológicos e recuperação dos serviços ecossistêmicos. Nesses sistemas, a interação entre espécies vegetais de diferentes estratos favorece a ciclagem de nutrientes, a proteção do solo, o sequestro de carbono e a ampliação da biodiversidade, aproximando os sistemas agrícolas do funcionamento dos ecossistemas naturais (Götsch, 2013; Crespo; Souza; Silva, 2023; Fernandes *et al.*, 2025; Lima *et al.*, 2025).

Dessa forma, o manejo agroecológico transcende a aplicação de técnicas isoladas, configurando-se como uma abordagem integrada que busca o equilíbrio entre solo, planta, ambiente e ser humano. Ao fortalecer os processos ecológicos e valorizar os recursos locais, contribui para a construção de sistemas produtivos mais resilientes, sustentáveis e adaptados às condições socioambientais de cada território (Costa, 2017; Souza *et al.*, 2025).

6. Agrobiodiversidade, mercado e comercialização: estratégias para sustentabilidade econômica e inserção produtiva

A agrobiodiversidade configura-se como um componente estratégico nos sistemas agroecológicos, ao possibilitar a diversificação produtiva e a ampliação

da oferta de alimentos. Sob a perspectiva ecológica, essa diversidade contribui para a estabilidade dos agroecossistemas, promovendo maior resiliência frente a estresses bióticos e abióticos. Do ponto de vista socioeconômico, a diversificação permite ao agricultor reduzir riscos produtivos, aperfeiçoar o uso dos recursos disponíveis e acessar diferentes nichos de mercado, favorecendo a geração de renda e a segurança alimentar (Altieri, 2012; Costa, 2017; Souza, 2026d).

A organização da produção com base em sistemas diversificados, como consórcios, policultivos e sistemas agroflorestais, possibilita a oferta de uma cesta diversificada de produtos, agregando valor à produção e ampliando as oportunidades de comercialização. Além disso, a diversidade produtiva favorece a distribuição da renda ao longo do ano, reduzindo a vulnerabilidade econômica das famílias rurais e fortalecendo a sustentabilidade dos agroecossistemas (Fernandes *et al.*, 2025; Gonçalves *et al.*, 2025; Zampieri *et al.*, 2025).

Essa diversificação também dialoga com a crescente demanda dos consumidores por alimentos mais saudáveis, frescos e produzidos de forma ambientalmente responsável. Nesse contexto, os produtos agroecológicos e orgânicos vêm conquistando espaços crescentes nos mercados locais, regionais e nacionais, impulsionados pela maior conscientização da sociedade acerca da qualidade alimentar, da saúde humana e dos impactos ambientais associados aos sistemas convencionais de produção (Sachs, 2002; Abramovay, 2003; Souza, 2026c).

O mercado de produtos orgânicos e agroecológicos tem apresentado crescimento significativo nas últimas décadas, representando uma oportunidade relevante para agricultores familiares e empreendimentos de base agroecológica. Além da comercialização de alimentos in natura, observa-se crescente valorização de produtos processados, artesanais e com identidade territorial, capazes de agregar valor econômico e fortalecer as economias locais (Fernandes *et al.*, 2025; Motta *et al.*, 2025).

Entretanto, a crescente expansão desse mercado também evidencia diferenças importantes entre os modelos de produção orgânica e agroecológica. Embora ambos compartilhem princípios relacionados à sustentabilidade ambiental, suas lógicas produtivas, formas de organização e relações com o

mercado apresentam particularidades que influenciam diretamente a construção da sustentabilidade dos sistemas agroalimentares. Essas diferenças são sintetizadas na Figura 7.



Figura 7. Sustentabilidade da produção à comercialização: distinções entre agricultura orgânica e agroecologia. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Conforme ilustrado na Figura 7, a agricultura orgânica frequentemente concentra seus esforços no atendimento às exigências normativas e mercadológicas, enquanto a agroecologia incorpora uma visão sistêmica mais ampla, envolvendo aspectos ecológicos, sociais, econômicos e culturais. Dessa forma, um produto certificado como orgânico não é necessariamente agroecológico, uma vez que a agroecologia pressupõe transformações estruturais não apenas nos processos produtivos, mas também nas relações de comercialização, consumo e organização social dos sistemas agroalimentares.

Nesse cenário, iniciativas coletivas de organização social assumem papel fundamental para ampliar a competitividade dos agricultores familiares. Cooperativas, associações e redes de comercialização solidária favorecem ganhos de escala, compartilhamento de infraestrutura, fortalecimento da identidade dos produtos e ampliação do acesso aos mercados consumidores, contribuindo para a permanência das famílias no campo e para o

desenvolvimento rural sustentável (Caporal; Costabeber, 2004; Motta *et al.*, 2025).

Dessa forma, o fortalecimento de circuitos curtos de comercialização, a organização coletiva dos produtores e o desenvolvimento de estratégias logísticas adequadas são fundamentais para ampliar a inserção dos produtos agroecológicos no mercado. A articulação entre agrobiodiversidade, agregação de valor e comercialização revela-se essencial para a viabilidade econômica dos empreendimentos rurais e para a consolidação de sistemas produtivos sustentáveis, resilientes e socialmente inclusivos (Sachs, 2002; Souza *et al.*, 2025).

7. Segurança sanitária e desafios produtivos: controle microbiológico e qualidade dos sistemas orgânicos

A produção orgânica e agroecológica, embora reconhecida por seus benefícios ambientais, sociais e à saúde humana, demanda rigorosos cuidados no que se refere à segurança sanitária, especialmente no manejo de insumos orgânicos e na prevenção de contaminações microbiológicas. A ausência de insumos químicos sintéticos exige maior atenção aos processos naturais e ao monitoramento das condições de produção, de modo a garantir a inocuidade dos alimentos e a qualidade dos produtos ofertados ao consumidor (Primavesi, 2016; Souza, 2026).

Nesse contexto, o uso de esterco animais constitui um ponto crítico dentro dos sistemas produtivos. Quando manejados de forma inadequada, esses insumos podem atuar como veículos de microrganismos potencialmente patogênicos, comprometendo a segurança sanitária da produção. Assim, a compostagem adequada torna-se uma etapa indispensável, devendo ser conduzida com controle rigoroso de temperatura, umidade, aeração e tempo de maturação, assegurando a sanitização do material e a estabilização da matéria orgânica. Além de reduzir riscos sanitários, esse processo favorece a ciclagem de nutrientes e o fortalecimento da fertilidade biológica do solo (Primavesi, 2016; Paula *et al.*, 2025; Silva *et al.*, 2025).

Outro aspecto relevante refere-se à qualidade da água utilizada na irrigação e nas atividades de manejo agrícola. A contaminação hídrica pode comprometer diretamente a segurança dos alimentos, especialmente em culturas consumidas in natura. Nesse sentido, a adoção de sistemas de irrigação localizada, como o gotejamento, contribui para minimizar riscos de contaminação ao reduzir o contato direto da água com a parte aérea das plantas. Paralelamente, o monitoramento periódico da qualidade da água constitui uma prática essencial para assegurar a conformidade sanitária dos sistemas produtivos (Souza, 2015; Motta *et al.*, 2025).

A segurança sanitária dos sistemas orgânicos e agroecológicos, entretanto, dependem da integração de diversas práticas de manejo que atuam de forma complementar ao longo de toda a cadeia produtiva, conforme ilustrado na Figura 8.

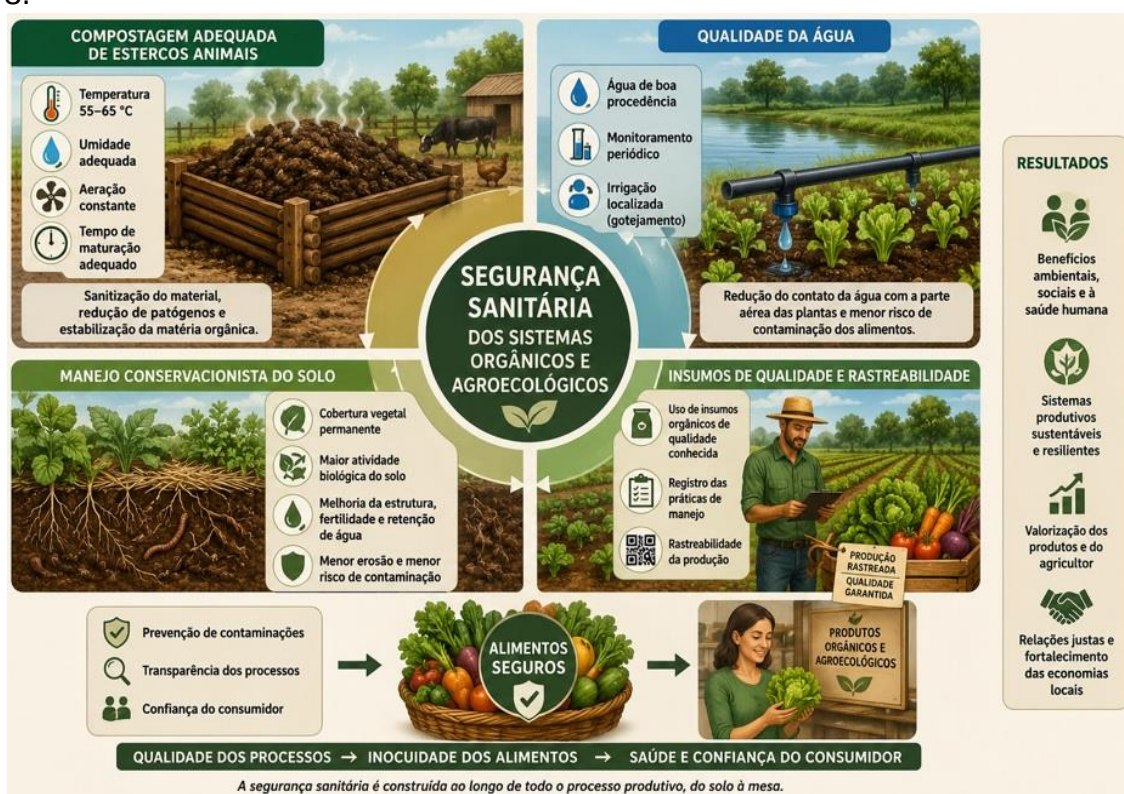


Figura 8. Fatores determinantes da segurança sanitária em sistemas orgânicos e agroecológicos. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (ChatGPT).

Além da qualidade da água, práticas como o manejo conservacionista do solo, a manutenção da cobertura vegetal, a utilização de insumos de qualidade

conhecida e a rastreabilidade da produção desempenham papel fundamental na prevenção de contaminações e na garantia da qualidade dos alimentos. Essas estratégias reforçam a transparência dos processos produtivos e ampliam a confiança dos consumidores em relação aos produtos orgânicos e agroecológicos (Caporal; Costabeber, 2004; Costa, 2017).

A qualidade do solo também está diretamente relacionada à segurança sanitária dos sistemas agrícolas. Solos biologicamente ativos apresentam maior diversidade de organismos decompositores e antagonistas naturais, favorecendo processos ecológicos que contribuem para a estabilidade dos agroecossistemas e para a redução de desequilíbrios biológicos que possam favorecer a proliferação de organismos indesejáveis (Odum; Barrett, 2007; Sá *et al.*, 2025).

Sob uma perspectiva mais ampla, a segurança sanitária integra o conceito de qualidade dos sistemas agroalimentares sustentáveis, envolvendo não apenas a ausência de contaminantes, mas também a preservação dos recursos naturais, a adoção de boas práticas agrícolas e o compromisso com a saúde humana e ambiental. Dessa forma, os sistemas agroecológicos e orgânicos buscam conciliar produtividade, qualidade dos alimentos e responsabilidade socioambiental em todas as etapas da cadeia produtiva (Sachs, 2002; Souza *et al.*, 2025).

Dessa forma, a segurança sanitária nos sistemas orgânicos e agroecológicos não devem ser compreendidas como um obstáculo, mas como um componente essencial da qualidade produtiva. O atendimento a esses requisitos fortalece a confiança do consumidor, amplia o acesso a mercados diferenciados e contribui para a consolidação de sistemas alimentares mais seguros, resilientes e sustentáveis (Abramovay, 2003; Souza, 2026).

8. Transição agroecológica e mudança de paradigma: processos adaptativos e reconstrução dos sistemas produtivos

A transição agroecológica deve ser compreendida como um processo dinâmico, contínuo e multidimensional de transformação de sistemas agrícolas convencionais em sistemas mais sustentáveis, resilientes e integrados aos

processos ecológicos. Não se trata de um estado final ou de um modelo fixo, mas de uma trajetória evolutiva na qual os agroecossistemas são gradativamente reconfigurados a partir da incorporação de princípios ecológicos, sociais, econômicos, culturais e políticos (Caporal; Costabeber, 2004; Gliessman, 2015; Souza, 2026).

Nesse contexto, o agricultor assume papel central como agente ativo na condução desse processo, atuando simultaneamente como gestor, experimentador e produtor de conhecimento. A construção do saber ocorre de forma empírica e contextualizada, baseada na observação, na experimentação e na interação com outros atores sociais, como técnicos, pesquisadores e comunidades locais. Esse protagonismo contribui para o fortalecimento da autonomia produtiva e para a adaptação das práticas às condições específicas de cada território (Sachs, 1986; Leff, 2001; Altieri, 2004; Costa, 2017; Souza, 2026d).

A implantação de biofábricas de insumos agroecológicos representa uma estratégia relevante nesse processo de transição, ao possibilitar a produção local de biofertilizantes, extratos vegetais e outros insumos biológicos. Essa prática reduz a dependência de insumos externos, diminui os custos de produção e promove maior controle sobre os processos produtivos, além de estimular a inovação e o intercâmbio de conhecimentos no âmbito das propriedades rurais e das organizações de agricultores (Magalhães *et al.*, 2025; Souza, 2026).

Do ponto de vista epistemológico, a transição agroecológica implica uma mudança paradigmática significativa. A lógica de controle absoluto da natureza, característica do modelo convencional, é substituída por uma abordagem baseada na compreensão, no respeito e no manejo dos processos ecológicos. Assim, o foco desloca-se do controle para o equilíbrio, da simplificação para a diversidade, da especialização excessiva para a integração dos componentes do sistema e da dependência externa para a autonomia produtiva (Leff, 2001; Wezel *et al.*, 2009; Gliessman, 2015; Souza, 2026b).

A transição agroecológica também envolve transformações nas formas de organização social, comercialização e gestão dos recursos naturais, fortalecendo processos coletivos de aprendizagem, cooperação e construção de alternativas econômicas compatíveis com os princípios da sustentabilidade.

Nesse sentido, a agroecologia extrapola os limites da unidade produtiva e passam a influenciar as relações entre agricultores, consumidores, instituições e territórios, contribuindo para o desenvolvimento rural sustentável (Shiva, 1988; Lutzenberger, 1990; Abramovay, 2003; Sachs, 2002; Souza *et al.*, 2025; Souza, 2026e). Essas mudanças demandam maior aproximação entre os diferentes atores que compõem os sistemas agroalimentares, conforme ilustrado na Figura 9.



Figura 9. Mudanças de comportamento necessárias à transição agroecológica: maior envolvimento entre produtores e consumidores. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Conforme evidenciado na Figura 9, a transição agroecológica pressupõe não apenas mudanças nos processos produtivos, mas também transformações nas relações de consumo, comercialização e participação social, fortalecendo a corresponsabilidade entre produtores e consumidores na construção de sistemas alimentares mais sustentáveis.

Ao longo deste capítulo foram discutidos os fundamentos epistemológicos da agroecologia, suas interfaces com a agricultura orgânica, as práticas de manejo sustentável, a importância da agrobiodiversidade, os desafios sanitários e os processos de transformação dos agroecossistemas. Em conjunto, esses elementos evidenciam que a agroecologia constitui uma abordagem abrangente

e integradora, capaz de articular conservação ambiental, viabilidade econômica e justiça social.

Particularmente no contexto da cafeicultura, tais princípios fornecem as bases conceituais para a construção de sistemas produtivos mais resilientes, sustentáveis e alinhados às demandas contemporâneas da sociedade, conduzindo naturalmente às reflexões apresentadas nas considerações finais deste capítulo.

9. Considerações

A agroecologia e a agricultura orgânica configuram-se como abordagens complementares e estratégicas na busca por sistemas agrícolas mais sustentáveis, resilientes e socialmente justos. Enquanto a agricultura orgânica se destaca por sua estrutura normativa e por assegurar padrões de produção e qualidade por meio de processos de certificação, a agroecologia amplia essa perspectiva ao incorporar uma visão sistêmica e transformadora dos agroecossistemas.

Sob esse enfoque, a agroecologia transcende a dimensão técnica, integrando aspectos ecológicos, sociais, culturais, econômicos e políticos, e promovendo a reconfiguração das relações entre sociedade e natureza. Ao valorizar a agrobiodiversidade, os saberes tradicionais e a autonomia dos agricultores, essa abordagem contribui para a construção de sistemas produtivos mais equilibrados, diversificados e adaptados às realidades locais.

Além disso, ao articular ciência e prática, a agroecologia oferece respostas consistentes aos desafios contemporâneos da produção de alimentos, tais como a degradação dos recursos naturais, as mudanças climáticas, a insegurança alimentar e as desigualdades sociais no campo. A valorização dos processos ecológicos, da ciclagem de nutrientes, da conservação da biodiversidade e da regeneração dos solos fortalece a capacidade adaptativa dos agroecossistemas, aumentando sua resiliência diante das instabilidades ambientais e econômicas.

A transição agroecológica, por sua vez, deve ser compreendida como um processo contínuo de aprendizagem, inovação e reconstrução dos sistemas produtivos. Mais do que a substituição de insumos ou a adoção de técnicas

específicas, esse processo envolve mudanças de percepção, gestão e relacionamento com os recursos naturais, estimulando a autonomia produtiva, a redução da dependência de insumos externos e o fortalecimento das capacidades locais de produção e organização social.

Outro aspecto relevante refere-se à contribuição da agroecologia para a manutenção e recuperação dos serviços ecossistêmicos, incluindo a conservação do solo e da água, a regulação climática, a polinização, a ciclagem de nutrientes e a preservação da biodiversidade. Esses benefícios reforçam a importância dos sistemas agroecológicos não apenas para a produção agrícola, mas também para a sustentabilidade dos territórios rurais e para o bem-estar das gerações presentes e futuras. Além disso, a adoção de práticas relacionadas à segurança sanitária, ao manejo adequado de insumos orgânicos, à qualidade da água e à rastreabilidade da produção fortalece a qualidade dos alimentos, amplia a confiança dos consumidores e favorece a inserção dos produtos agroecológicos em mercados cada vez mais exigentes.

Particularmente na cafeicultura, os princípios agroecológicos assumem relevância estratégica diante dos desafios relacionados à conservação do solo, à manutenção dos recursos hídricos, à adaptação às mudanças climáticas, ao manejo ecológico de pragas e doenças e à busca por maior qualidade física, química e sensorial dos grãos. A diversificação produtiva, o uso de plantas de cobertura, os sistemas agroflorestais, a adubação verde, o manejo conservacionista das entrelinhas, a valorização da biodiversidade funcional e o fortalecimento dos serviços ecossistêmicos constituem ferramentas fundamentais para a construção de sistemas cafeeiros mais resilientes, produtivos e ambientalmente sustentáveis.

Nesse contexto, os fundamentos apresentados neste capítulo fornecem a base conceitual necessária para a compreensão dos temas abordados ao longo desta obra. Os capítulos subsequentes explorarão diferentes dimensões da cafeicultura agroecológica, evidenciando como os princípios da agroecologia podem ser aplicados ao manejo dos cafezais, à conservação dos recursos naturais, à melhoria da qualidade do café, à redução da dependência de insumos externos, ao fortalecimento dos circuitos curtos de comercialização, à

aproximação entre produtores e consumidores, à valorização dos agricultores e ao fortalecimento da sustentabilidade dos territórios rurais.

Dessa forma, a consolidação de sistemas agroecológicos e orgânicos depende não apenas da adoção de práticas sustentáveis, mas também do fortalecimento de políticas públicas, da ampliação do acesso ao conhecimento, da pesquisa participativa, da assistência técnica especializada e da valorização dos mercados locais e regionais. No âmbito da cafeicultura, esses elementos representam condições essenciais para promover sistemas produtivos mais eficientes, resilientes e alinhados aos princípios da sustentabilidade.

Nesse cenário, a agroecologia se afirma como um paradigma capaz de orientar a transição para uma cafeicultura ambientalmente responsável, economicamente viável e socialmente justa, contribuindo simultaneamente para a produção de cafés de qualidade, a conservação dos recursos naturais, a geração de renda, o fortalecimento dos territórios rurais e a melhoria da qualidade de vida das gerações presentes e futuras.

10. Referências

ABRAMOVAY, R. **O futuro das regiões rurais**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2003.

ALTIERI, M. A. **Agroecologia**: bases científicas para uma agricultura sustentável. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

ALTIERI, M. A. **Agroecologia**: bases científicas para uma agricultura sustentável. 3. ed. São Paulo: Expressão Popular: Rio de Janeiro: AS-PTA, 2012.

ALTIERI, M. A. Linking ecologists and traditional farmers in the search for sustainable agriculture. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 2, n. 1, p. 35-42, 2004.

BESTETI, P. I. de O.; CARVALHO, R. C. B.; BERMOND, K. Z.; SALVADOR, L.; LIMA, M. da S. P.; PORTO, L. L.; RODRIGUES, P. D.; ZACARIAS, A. J.; AMARAL, A. A. do; GORONCI, J. de F.; SOUZA, M. N. Desafios e perspectivas da agricultura sustentável: impactos da agricultura convencional e práticas agroecológicas para a recuperação do solo e da produção de café. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em Cafeicultura vol. v – Cafeicultura Agroecológica**. Canoas: Mérida Publishers, 2025, p. 257-281. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-35-0.c9>

CAPORAL, F. R.; COSTABEBER, J. A. **Agroecologia e desenvolvimento rural sustentável**: perspectivas para uma nova extensão rural. Porto Alegre: EMATER/RS, 2004.

CAPORAL, F. R.; COSTABEBER, J. A. **Agroecologia**: enfoque científico e estratégico. Porto Alegre: EMATER/RS, 2002.

COSTA, M. B. B. da. **Agroecologia no Brasil**: história, princípios e práticas. Curitiba: CRV, 2017.

CRESPO, A. M.; SOUZA, M. N.; Silva, M. A. B. da. Ciclo do carbono e sistemas agroflorestais na sustentabilidade da produção agrícolas: revisão de literatura. **INCAPER EM REVISTA**, v. 13, p. 06-19, 2023. Home page: <https://editora.incaper.es.gov.br/incaper-em-revista>. DOI:10.54682/ier.v.13e14.p06.19.

DESTEFANI, J. D.; CARVALHO, S. W. S. de; FERRI, A. G.; ARAUJO, O. P.; AMARAL, A. A. do; NOVAES, C. A. de; FERNANDES, M. A.; MENON, M. M.; SOUZA, M. A. A. da S.; SOUZA, M. N. Entre o cultivo e o compromisso: agroecologia, justiça social e sustentabilidade em debate. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas vol. x**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. p. 276-310. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-34-3.c10>.

EGIDIO, L. S.; SOUZA, M. N. Recuperação de áreas degradadas na Mata Atlântica: 23 anos de restauração ecológica e agrofloresta na Estância São Lucas, Guaçuí – ES. Restoration of degraded areas in the Atlantic Forest: 23 years of ecological restoration and agroforestry in the Estância São Lucas, Guaçuí, ES. **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v. 14, p. 230-241, 2025. Home page: <https://periodicos.unievangelica.edu.br/index.php/fronteiras/article/view/7988>. DOI: 10.21664/2238-8869.2025 v14i3.7988.

FERNANDES, D. da C.; ESTEVÃO, D. R. ; FERRARI, J. L.; RANGEL, L. H.; SOUZA, M. N.; PELUZIO, T. M. de O. Agricultura sintrópica na cafeicultura do sítio Recanto dos Tucanos Alto Caparaó, MG. In: PELUZIO, J. B. E. *et al.* (Org.) **A cafeicultura do Caparaó [recurso eletrônico]**: resultado de pesquisas VIII. – Alegre, ES: p. 49-70. 2025.

FERNANDES, M. A.; ZANUNCIO JR., J. S.; COSTA, W. M. da; NOVAES, C. A. de; NOVAES, G. A. de; SOUZA, M. N. Diversificação agrícola e comercialização de produtos vegetais em assentamentos e comunidades rurais do Sul do Espírito Santo. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em gestão ambiental. vol. IV**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. p. 272-318. ISBN: 978-65-84548-36-7. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-36-7>.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia**: processos ecológicos em agricultura sustentável. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2001.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecology**: the ecology of sustainable food systems. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.

GOMES, A. L. C.; PINHEIRO, A. C. M.; BERMOND, K. Z.; ADÃO, J. E. A.; LIMA, M. da S. P.; SÁ, W. G. de; PAULA, F. B. de; AMARAL, A. A. do; SOUZA, M. N. Bioindicadores e controle ecológico: estratégias sustentáveis no manejo de pragas e doenças agrícolas. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em Cafeicultura Vol. V – Cafeicultura Agroecológica**. Canoas: Mérida Publishers, 2025, p. 120-161. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-35-0.c4>

GOMES, J. P. A.; MOULIN, M. M.; SANTOS JÚNIOR, A. C.; SOUZA, M. N. **Agricultura orgânica e microrganismos eficientes**: aumento produtivo de forma sustentável / João Paulo Andrade Gomes ... [et al.] – Alegre: Edifes acadêmico, 2022. 22 f. il. ISBN: 978-85-8263-584-1 (livro digital). 9788582635841

GONÇALVES, M. M.; EGIDIO, L. S.; OLIVEIRA, C. H. R. de; FIM, B. P.; COSTA, W. M. da; SOUZA, M. N. Análise integrada das práticas de manejo, cultivares e sistemas agroflorestais na Fazenda Experimental de Bananal do Norte (FEBN), Cachoeiro de Itapemirim, ES. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em gestão ambiental. vol. IV**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. p. 149-172. ISBN: 978-65-84548-36-7. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-36-7>.

GÖTSCH, E. Bases para a agricultura sintrópica. **Revista Agriculturas**, v. 10, n. 2, p. 8-13, 2013.

LEFF, E. **Saber ambiental**: sustentabilidade, racionalidade, complexidade, poder. Petrópolis: Vozes, 2001.

LIMA, O. de A.; SILVA, E. P. da; GOMES, A. L. C.; COSTA, W. M. da; SOUZA, M. A. A. da S.; SOUZA, M. N. Agricultura sintrópica como estratégia de conservação ambiental e produtividade sustentável. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em gestão ambiental. Vol. IV**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. p. 41-67. ISBN: 978-65-84548-36-7. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-36-7>

LUTZENBERGER, J. **Fim do futuro?** Manifesto ecológico brasileiro. Porto Alegre: Movimento, 1980.

LUTZENBERGER, J. **Gaia**: o planeta vivo. Porto Alegre: L&PM, 1990.

MACHADO, L. C. A.; XAVIER, S. A. B.; PAULA, F. S.; TAVARES, L. R.; VARDIERO, L. G. G.; SOUZA, M. N.; SILVA, M. A. P.; MOULIN, M. M.; SANTOS, A. T. B. Banco de sementes crioulas da Escola Família Agrícola de Cachoeiro de Itapemirim-ES: um relato de caso. **Pesquisa Científica**, v. 5, n. 4, p. 1205-1217, 2026. DOI: 10.36557/2674-9432.2026v5n4p1205-1217. Disponível em: <https://periodicosbrasil.emnuvens.com.br/revista/article/view/989>.

MASSARIOL, B. P.; PERON, I. B.; NOVELLO, J. S.; LIMA, M. da S. P.; SOUZA, D. S. M. de; ADÃO, J. E. A.; COSTA, W. M. da; AZEVEDO, P. P. M.; MENON, M. M.; SOUZA, M. N. Três faces da sustentabilidade rural: agroecologia, agricultura orgânica e transição agroecológica. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em Cafeicultura Vol. V – Cafeicultura Agroecológica**. Canoas: Mérida

Publishers, 2025, p. 52-92. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-35-0.c2>

MOTTA, V. L.; SOUZA, M. N.; SOUSA, E. A. de; NOVAES, G. A. de; AMARAL, A. A. do. Panorama da agricultura familiar: uma análise multiescalar do Brasil ao Caparaó Capixaba. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas Vol. X**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. p. 204-226. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-34-3.c7>

ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988. 434 p.

ODUM, E. P.; BARRETT, G. W. **Fundamentos de Ecologia**. 5. ed. Rio de Janeiro: Thomson Learning, 2007.

PAULA, F. B. de; MIRANDO, I. R.; CARVALHO, R. C. B.; BRUNELI, L. V.; COLODETTI, W. F.; COSTA, W. M. da; BRUNELI, L. V.; ZACARIAS, A. J.; AMARAL, A. A. do; SOUZA, M. N. Adubação verde: práticas tradicionais e inovações para uma agricultura de baixo impacto. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em Cafeicultura Vol. V – Cafeicultura Agroecológica**. Canoas: Mérida Publishers, 2025, p. 93-119. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-35-0.c3>

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. 2. ed. São Paulo: Nobel, 1980.

PRIMAVESI, A. **Manual do solo vivo: solo sadio, planta sadia, ser humano sadio**. São Paulo: Expressão Popular, 2016.

RICKLEFS, R. E.; RELYEA, R. **A Economia da Natureza**. 7. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2018.

SÁ, W. G. de; MENON, M. M.; COSTA, W. M. da; AMARAL, A. A. do; SOUZA, M. N. Bioindicação da qualidade do solo: papel ecológico e funcional da macrofauna edáfica. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em gestão ambiental. Vol. IV**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. p. 173-195. ISBN: 978-65-84548-36-7. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-36-7>.

SACHS, I. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. 3. ed. Rio de Janeiro: Garamond, 2002.

SACHS, I. **Ecodesenvolvimento: crescer sem destruir**. São Paulo: Vértice, 1986.

SARDINHA, M. P. R.; SOUZA, M. N.; BERILLI, A. P. C. G. Certificação de produtos orgânicos no município de Nova Venécia-ES e suas externalidades positivas. In: GARCIA, L. M. H. **Agroecologia: princípios e fundamentos ecológicos aplicados na busca de uma produção sustentável**. 2021. p. 95-117.

SHIVA, V. **Monoculturas da mente: perspectivas da biodiversidade e da biotecnologia**. São Paulo: Gaia, 2003.

SHIVA, V. **Staying alive: women, ecology and development.** Londres: Zed Books, 1988.

SILVA, E. P. da S.; LIMA, O. de A.; SOUZA, M. N.; PASTOR, T. de S.; COSTA, W. M. da. Uso de resíduos de esgoto em sistemas de produção agroecológicos: formas, leis e resultados. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas.** Vol. IX. – Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. p. 165-201. **ISBN:** 978-65-84548-33-6. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-33-6.c6>

SOUZA, E. L. de S.; SOUZA, M. N.; PELUZIO, T. M. O.; OLIVEIRA, A. de F. M. de; CARVALHO, R. C. B.; SILVA, E. P. da; LIMA, O. de A.; NOVAES, C. A. de; NOVAES, G. A. de. Desafios e perspectivas da agroecologia para alcançar a realização dos objetivos do desenvolvimento sustentável. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas.** Vol. IX. – Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. p. 45-69. **ISBN:** 978-65-84548-33-6. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-33-6.c1>.

SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em cafeicultura Vol. V - cafeicultura agroecológica I.** Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. 310 p. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-35-0>.

SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em gestão ambiental.** Vol. IV. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. 346 p. **ISBN:** 978-65-84548-36-7. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-36-7>.

SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas Vol. X.** Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. 313 p. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-34-3>.

SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas.** Vol. IX. – Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. 322 p. **ISBN:** 978-65-84548-33-6. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-33-6>.

SOUZA, M. N. A origem da agroecologia. In: SOUZA, M. N. **Agroecologia: a sustentabilidade verde - da agricultura convencional à transformação agroecológica.** Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026c. p. 33-44. **ISBN: 978-65-84548-44-2.** DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-44-2.c2>

SOUZA, M. N. Agroecologia em expansão: transformações sociais, ambientais e produtivas. In: SOUZA, M. N. **Agroecologia: a sustentabilidade verde - da agricultura convencional à transformação agroecológica.** Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026d. p. 98-110. **ISBN: 978-65-84548-44-2.** DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-44-2.c5>

SOUZA, M. N. Agroecologia: fundamentos conceituais e princípios orientadores. In: SOUZA, M. N. **Agroecologia: a sustentabilidade verde - da agricultura convencional à transformação agroecológica.** Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026b. p. 21-32. **ISBN: 978-65-84548-44-2.** DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-44-2.c1>.

SOUZA, M. N. Conversão da agricultura convencional para agroecológica. In: SOUZA, M. N. **Agroecologia: a sustentabilidade verde - da agricultura convencional à transformação agroecológica**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026e. p. 123-130. **ISBN: 978-65-84548-44-2**. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-44-2.c7>.

SOUZA, M. N. **Degradação antrópica e procedimentos de recuperação ambiental**. Balti, Moldova, Europe: Novas Edições Acadêmicas, 2018. 376 p.

SOUZA, M. N. **Mudanças no uso do solo e da água e a gestão dos recursos naturais**. Frankfurt, Alemanha: Novas Edições Acadêmicas, 2015. 376 p.

SOUZA, M. N.; COSTA, W. M. da; AMARAL, A. A. do; GUMIERE, T. S.; MACHADO, L. C. A.; XAVIER, S. A. B.; GUIA, I. B. da; SANTOS, A. T. B. dos; ALMEIDA, D. S. de. Gestão ambiental e as dimensões da sustentabilidade agroecológica. In: SOUZA, M. N. (org.). **Tópicos em Gestão Ambiental: v. 5**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026d. p. 36-58. ISBN 978-65-84548-45-9. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-45-9.c1>

SOUZA, M. N.; MAGALHÃES, M. V. D. de; LOPES, L. B.; AMARAL, A. A. do; MUNIZ, F.; PANCOTTO, T. A. Transição sustentável: caminhos para a construção de sistemas produtivos resilientes. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas Vol. X**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. p. 68-111. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-34-3.c2>.

WEZEL, A.; BELLON, S.; DORÉ, T.; FRANCIS, C.; VALLADARES, G.; DAVID, C. Agroecology as a science, a movement and a practice. **Agronomy for Sustainable Development**, Versailles, v. 29, n. 4, p. 503-515, 2009. DOI: 10.1051/agro/2009004.

ZAMPIERI, F. G.; ZAMPIERI, F. R. O.; BESTETI, P. I. de O.; SOUZA, M. A. A. da S.; BERMOND, K. Z.; NOVAES, C. A. de; PANCOTTO, T. A.; GOMES, A. L. C.; NOVAES, G. A. de; MUNIZ, F.; SOUZA, M. N. Café, solo e saber: a educação ambiental como instrumento de sustentabilidade na agroecologia. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em Cafeicultura Vol. V – Cafeicultura Agroecológica**. Canoas: Mérida Publishers, 2025, p. 282-306. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-35-0.c10>.

CAPÍTULO 2

Déficit hídrico e fenologia reprodutiva do cafeeiro: da ecofisiologia da planta à construção de sistemas produtivos resilientes

Fernanda Barcelos de Paula, Ludmila Lisbôa Porto, Magno do Carmo Parajara, Jozimara Teixeira de Souza, Déborah Sampaio de Almeida, Willian Moreira da Costa, Regiane Carla Bolzan Carvalho, Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira, Atanásio Alves do Amaral, Maurício Novaes Souza

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-46-6.c2>

Resumo

A fenologia reprodutiva do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) constitui um dos principais fatores determinantes da produtividade, da qualidade dos grãos e da sustentabilidade da cafeicultura. A ocorrência e a duração dos diferentes estádios fenológicos são fortemente influenciadas pelas condições climáticas, especialmente pela disponibilidade hídrica. Esta revisão de literatura analisa os efeitos do déficit hídrico sobre o desenvolvimento reprodutivo do cafeeiro, abordando os mecanismos fisiológicos envolvidos, os impactos sobre a formação e a qualidade dos frutos e as principais estratégias de adaptação utilizadas na cafeicultura contemporânea. Os estudos revisados demonstram que restrições hídricas moderadas podem atuar como estímulo fisiológico para a indução e uniformização da floração, enquanto déficits severos e prolongados comprometem processos metabólicos essenciais, reduzindo o pegamento floral, a expansão celular, o enchimento dos frutos e o acúmulo de compostos relacionados à qualidade física e sensorial da bebida. As fases de granação inicial, enchimento dos grãos e maturação destacam-se como os períodos de maior sensibilidade ao estresse hídrico. A revisão evidencia ainda que a adaptação da cafeicultura aos cenários de variabilidade climática depende da integração entre irrigação racional, manejo conservacionista do solo, sistemas agroecológicos, tecnologias de monitoramento, conservação da água e utilização de cultivares mais tolerantes à seca. Conclui-se que a resiliência dos sistemas cafeeiros resulta da interação entre genética, ambiente e manejo, sendo fundamental para a manutenção da produtividade, da qualidade da bebida e da sustentabilidade da produção frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

Palavras-chave: Estresse abiótico. Relações hídricas. Qualidade dos grãos. Agroecossistemas resilientes. Manejo conservacionista. Melhoramento genético.

1. Introdução

Consolidado como uma das *commodities* agrícolas mais importantes do mundo, pertencente ao gênero *Coffea*, o café ocupa posição de destaque no comércio internacional e na economia de diversos países produtores. Sua relevância transcende os aspectos econômicos, estando profundamente inserido nos hábitos alimentares, nas práticas socioculturais e no cotidiano de milhões de pessoas em diferentes regiões do planeta. Em função de sua ampla aceitação e expressiva participação nos mercados globais, o café figura entre as bebidas mais consumidas mundialmente, desempenhando papel estratégico na geração de renda, emprego e desenvolvimento regional (ICO, 2024).

No panorama brasileiro, país que sustenta a liderança como maior produtor e exportador mundial, a cafeicultura é um dos pilares vitais do agronegócio. Além de equilibrar a balança comercial, a atividade desempenha um papel humanitário fundamental na manutenção de milhões de empregos diretos e indiretos, preservando a vitalidade socioeconômica de diversas regiões produtoras (CONAB, 2024).

No Espírito Santo, a cafeicultura possui grande importância econômica e social, destacando o estado como o maior produtor de café conilon do Brasil e um dos principais produtores nacionais de café. A atividade está diretamente ligada à geração de emprego, renda e ao fortalecimento da agricultura familiar, sendo fundamental para o desenvolvimento de diversos municípios capixabas. Além disso, o Espírito Santo se tornou referência na cafeicultura pela adoção de tecnologias, inovação e práticas sustentáveis, resultado da integração entre produtores, pesquisa e assistência técnica (Sousa *et al.*, 2026; Souza *et al.*, 2026).

Entretanto, a sustentabilidade da cafeicultura brasileira e capixaba enfrenta desafios cada vez mais intensos diante das mudanças climáticas e das limitações estruturais presentes no meio rural. A instabilidade climática compromete a regularidade das safras, aumenta os riscos no plantio e reduz a segurança produtiva das propriedades cafeeiras (Damatta; Ramalho, 2006; Souza *et al.*, 2012; Altieri *et al.*, 2015; Salvador *et al.*, 2025).

Somam-se a esse cenário a ineficiência operacional em algumas etapas da produção e o isolamento digital de muitos produtores rurais, fatores que

dificultam o acesso à informação, às tecnologias e à assistência técnica. Esses desafios impactam diretamente a produtividade, a competitividade e a qualidade de vida das famílias que dependem da cafeicultura, evidenciando a necessidade de estratégias sustentáveis, inovadoras e inclusivas para fortalecer o setor (Souza *et al.*, 2012; Salvador *et al.*, 2025). As principais dimensões dessa vulnerabilidade são sintetizadas na Figura 1.



Figura 1. Principais dimensões de vulnerabilidade da cafeicultura contemporânea: operacionais, riscos hídricos e digitais. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Nesse cenário, a compreensão dos processos fisiológicos que regulam o desenvolvimento do cafeeiro torna-se fundamental para o enfrentamento dos riscos associados às mudanças climáticas e à disponibilidade hídrica. Entre esses processos, destaca-se a fenologia, responsável por descrever a sequência de eventos vegetativos e reprodutivos que determinam o crescimento, a floração e a produção da cultura.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe-se a analisar, sob a ótica de uma revisão de literatura, os impactos multifacetados do déficit hídrico sobre as diferentes fases fenológicas reprodutivas do cafeeiro. A revisão busca correlacionar a escassez de água com o rendimento produtivo e a qualidade sensorial dos grãos, identificando criticamente os períodos de maior vulnerabilidade fisiológica, especialmente as fases de expansão e granação dos frutos.

2. Fenologia reprodutiva do cafeeiro

A fenologia constitui o ramo da ciência que estuda a ocorrência, a duração e a sequência dos eventos biológicos ao longo do ciclo de vida das plantas, relacionando-os às condições ambientais predominantes. Nas espécies perenes, a observação sistemática desses eventos fornece informações fundamentais para compreender as respostas fisiológicas às variações climáticas e orientar práticas de manejo agrícola (Bencke; Morellato, 2002; Pizol, 2021). No cafeeiro (*Coffea arabica* L.), o conhecimento fenológico assume importância estratégica, uma vez que o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo apresenta elevada sensibilidade às condições hídricas e térmicas do ambiente.

Diferentemente de muitas espécies vegetais que completam seus processos de floração e frutificação em um único ano, o cafeeiro (*Coffea arabica* L.) apresenta um ciclo biológico mais longo e complexo, no qual o crescimento vegetativo e a produção ocorrem de forma simultânea e interdependente em ramos de diferentes idades. Em geral, a planta necessita de aproximadamente dois anos para atingir a maturidade fisiológica e iniciar plenamente sua atividade reprodutiva (Carvalho, 2008). A partir desse estágio, passa a apresentar um ciclo fenológico caracterizado pela sobreposição temporal de eventos vegetativos e reprodutivos, cuja dinâmica se desenvolve ao longo de cerca de dois anos agrícolas consecutivos, conforme representado na Figura 2.



Figura 2. Dinâmica do ciclo fenológico reprodutivo do cafeeiro: sucessão das seis fases de desenvolvimento em ambiente tropical. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A dinâmica temporal apresentada na Figura 2 evidencia a natureza contínua e sobreposta do desenvolvimento reprodutivo do cafeeiro. Com base na descrição clássica de Camargo e Camargo (2001) para as cultivares Catuaí e Mundo Novo, o ciclo pode ser estruturado em seis fases capitais que evidenciam a complexidade da espécie:

- ✓ Vegetação e formação de gemas: marcada pelo desenvolvimento das gemas foliares e dos ramos que servirão de base para a produção futura;
- ✓ Indução, maturação e dormência: período em que as gemas axilares são induzidas a se tornarem gemas florais, passando por um processo de maturação fisiológica;
- ✓ Antese: fase correspondente à florada propriamente dita, desencadeado pelo estímulo hídrico (chuva ou irrigação) após um período de estresse hídrico controlado (repouso seco);
- ✓ Expansão e granação dos frutos: fase crítica que compreende o estágio de “chumbinho”, a expansão celular e o posterior acúmulo de reservas no endosperma;
- ✓ Maturação dos frutos: estágio caracterizado pela intensificação de processos bioquímicos, acúmulo de açúcares e mudança de coloração do epicarpo, culminando no estágio cereja;
- ✓ Repouso e senescência: fase caracterizada pela dormência vegetativa e pela autopoda natural de ramos plagiotrópicos exauridos, preparando a planta para um novo ciclo reprodutivo. Nesse período, a restrição hídrica desempenha papel fisiológico fundamental na sincronização das gemas florais, cuja retomada do desenvolvimento ocorre após a reidratação promovida pelas primeiras chuvas da estação.

A sincronização da florada constitui um dos fenômenos fisiológicos mais importantes da fenologia do cafeeiro. A restrição hídrica moderada durante o período de dormência das gemas florais, seguida pela reidratação promovida pelas primeiras chuvas ou pela irrigação, atua como estímulo para a retomada do desenvolvimento e para a uniformização da florada (Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025) (Figura 3).

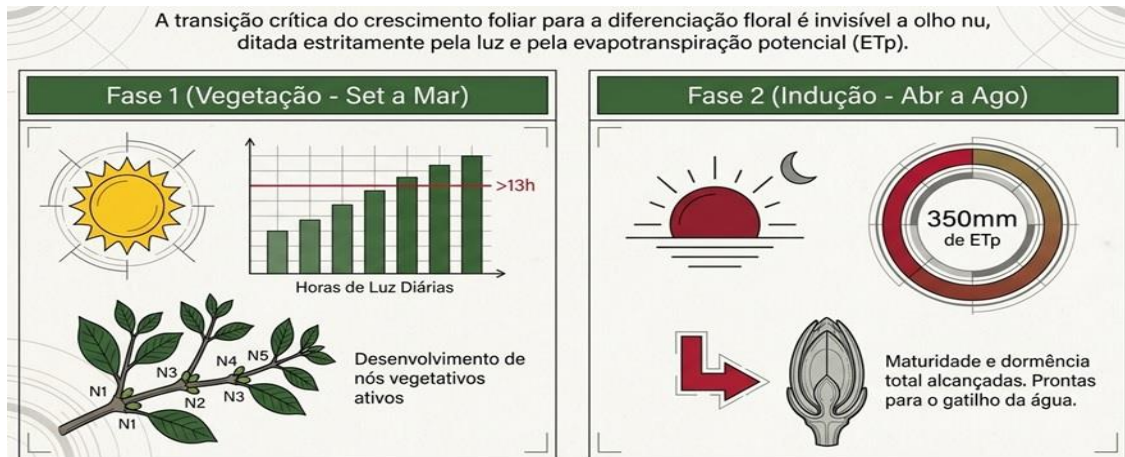


Figura 3. Fases de vegetação e indução floral do cafeeiro: influência do fotoperíodo e da evapotranspiração potencial. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Embora a Figura 3 sintetize os mecanismos fisiológicos envolvidos na sincronização da florada, a caracterização do desenvolvimento reprodutivo do cafeeiro requer uma descrição mais detalhada dos diferentes estágios fenológicos. Nesse sentido, Moraes *et al.* (2008) propuseram uma escala fenológica fundamentada em características morfométricas e na variação cromática de gemas, flores e frutos.

Essa subdivisão em estágios intermediários permite um monitoramento mais preciso do desenvolvimento da cultura, fornecendo subsídios para intervenções técnicas em momentos estratégicos do ciclo produtivo (Figura 4). Contudo, a interpretação desses estágios deve transcender a simples observação morfológica, integrando-se à compreensão das variações fisiológicas, metabólicas e nutricionais inerentes a cada fase do desenvolvimento.

Em termos práticos, o acompanhamento fenológico possibilita ajustar com maior precisão o manejo da irrigação, da adubação e das demais práticas culturais, reduzindo desperdícios de insumos e aumentando a eficiência produtiva. Além disso, o conhecimento detalhado da dinâmica fenológica permite identificar períodos de maior sensibilidade da planta a estresses ambientais, especialmente aqueles relacionados à disponibilidade hídrica e às oscilações

térmicas, fatores diretamente associados à produtividade e à qualidade final dos grãos (Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

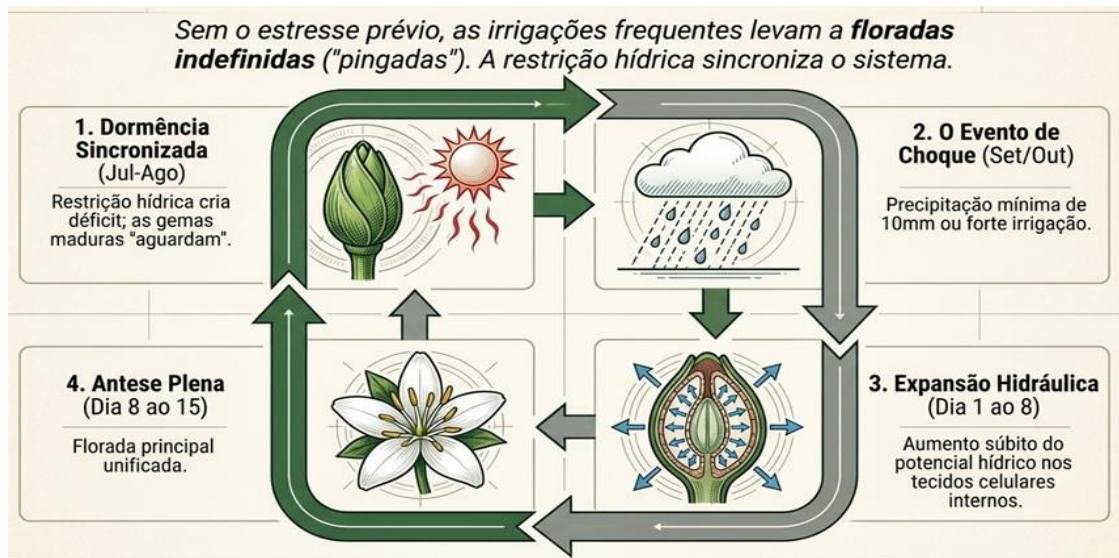


Figura 4. Sequência fisiológica da florada do cafeeiro: repouso, estímulo hídrico e abertura sincronizada das flores. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A sincronização da florada apresentada na Figura 4 constitui um evento determinante para a uniformidade do desenvolvimento reprodutivo do cafeeiro. Após a abertura das flores e a fecundação, inicia-se uma das etapas fisiologicamente mais exigentes do ciclo produtivo (Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

Nesse sentido, a transição entre a antese e a granação (Fases 3 e 4) representa o período de maior demanda por fotoassimilados, exigindo que o suprimento de nutrientes, especialmente nitrogênio e potássio, esteja em estreita sincronia com o desenvolvimento dos frutos, a fim de evitar o esgotamento precoce dos ramos produtivos e a intensificação da bienalidade produtiva.

Complementarmente, Almeida *et al.* (2016) destacam que a fenologia constitui importante ferramenta para o planejamento estratégico do manejo agrícola, enquanto Laviola *et al.* (2020) alertam para os impactos das variações climáticas sobre a duração e a dinâmica das fases fenológicas. Além da irregularidade das chuvas afetarem a sincronia da florada, a soma térmica (graus-dia) atua como um dos principais reguladores da velocidade de

desenvolvimento dos frutos. Durante as fases de granação e maturação, os frutos passam a atuar como intensos drenos metabólicos, demandando grande quantidade de fotoassimilados e reservas acumuladas pela planta.

Quando esse processo ocorre sob condições ambientais desfavoráveis, pode haver redução do vigor vegetativo e intensificação da senescência dos ramos produtivos. Diante dessa elevada demanda fisiológica, a água assume papel central na regulação do desenvolvimento fenológico do cafeeiro (Figura 5).

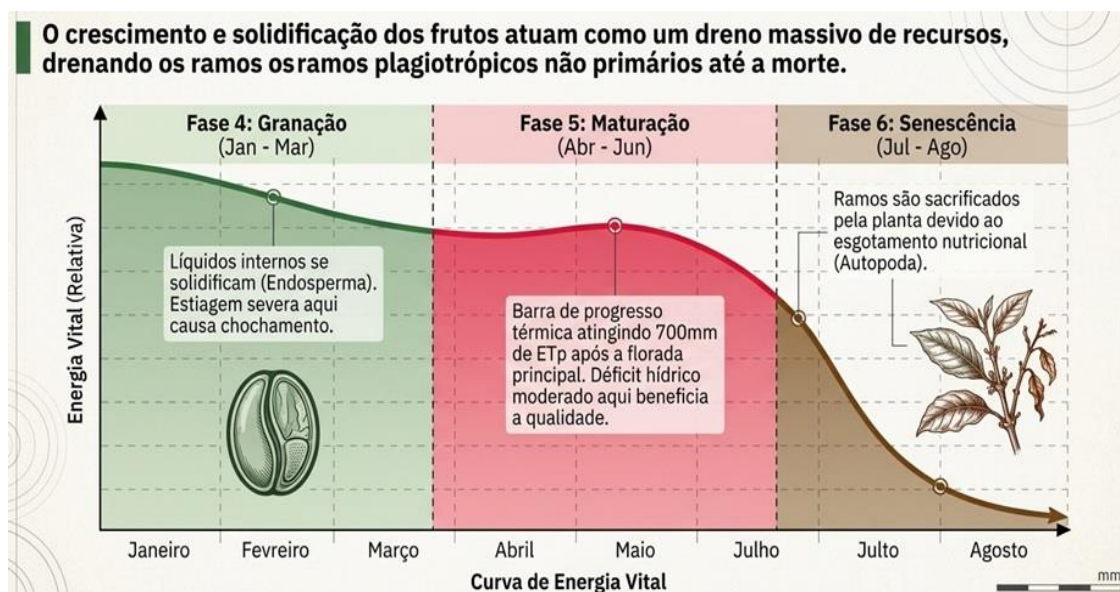


Figura 5. Intensificação do dreno de assimilados pelos frutos e declínio das reservas vegetativas nas fases finais do ciclo fenológico. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Nesse cenário, a água emerge como o elemento regente do desenvolvimento fenológico. No cafeeiro, a demanda hídrica flutua de forma acentuada ao longo do ciclo, tornando a gestão dos recursos hídricos o fator limitante para a sustentabilidade da lavoura. Meireles *et al.* (2009) observam que déficits severos durante o estágio vegetativo podem comprometer irreversivelmente a estrutura arquitetônica da planta e sua capacidade fotossintética futura.

Contudo, a relação do cafeeiro com o *status* hídrico apresenta uma dualidade fascinante: uma restrição hídrica moderada e estrategicamente conduzida no período que antecede a antese atua como um gatilho fisiológico essencial. Esse estresse controlado promove a quebra da dormência das gemas

e a uniformização da florada, potencializando o vingamento dos frutos e facilitando o manejo da colheita (Rena; Maestri, 1986; Assad *et al.*, 2004; Damatta *et al.*, 2007; Dubberstein *et al.*, 2017; Martins *et al.*, 2019). A identificação precisa dos estádios de desenvolvimento das gemas florais constitui importante ferramenta para o manejo da irrigação e para a previsão do florescimento, permitindo a adoção de estratégias que favoreçam a uniformidade da florada e o planejamento das operações de campo (Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025) (Figura 6).



Figura 6. Escala fenológica de desenvolvimento das gemas florais do cafeeiro: evolução morfológica de G1 à antese (FL). Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A caracterização dos estádios de desenvolvimento das gemas florais evidencia a estreita relação entre os fatores ambientais e a dinâmica reprodutiva do cafeeiro. Diante da crescente complexidade climática observada nas regiões produtoras, torna-se fundamental compreender como as variações na disponibilidade hídrica interferem em cada etapa desse processo. Entre os diferentes estágios fenológicos, a fase de indução floral destaca-se pela elevada sensibilidade às condições hídricas, constituindo um dos principais mecanismos de regulação do florescimento e da produtividade da cultura.

3. Indução floral e diferenciação de gemas

A fase de indução floral e diferenciação de gemas (Fase 2) constitui um dos momentos mais singulares e críticos no ciclo reprodutivo do *Coffea arabica* L. Durante este estágio, a planta responde de forma particular à disponibilidade hídrica: um déficit hídrico moderado não é apenas tolerado, mas necessário.

Esse estresse atua como um sinalizador fisiológico que favorece a maturação e a manutenção da dormência das gemas florais, preparando o terreno para uma floração exuberante e sincronizada assim que a disponibilidade de água é restabelecida, seja via precipitação ou irrigação (Damatta *et al.*, 2007; Alves, 2008; Meireles *et al.*, 2009; Martins *et al.*, 2019) (Figura 7).



Figura 7. Efeitos da disponibilidade hídrica sobre a florada do cafeeiro: da indução sincronizada ao abortamento floral. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Este mecanismo intrincado fundamenta-se em uma complexa sinalização hormonal. Sob restrição hídrica controlada, o equilíbrio entre promotores e inibidores de crescimento (como o ácido abscísico e as giberelinas) favorece a transição das gemas axilares do estado vegetativo para o reprodutivo (Laviola *et al.*, 2020). Esse mecanismo adaptativo de dormência temporária é o que permite ao cafeicultor obter maior uniformidade da florada, um dos atributos mais desejáveis para a eficiência da colheita e para a qualidade do produto final.

Entretanto, o equilíbrio dessa resposta biológica é sensível. Quando a deficiência hídrica ultrapassa os limites da resiliência fisiológica, seja pela severidade da seca, pela sua duração prolongada ou por ocorrer em um momento inadequado, o efeito benéfico se dissipa. Nesses cenários de estresse agudo, a planta entra em um estado de exaustão: o número de gemas diferenciadas declina drasticamente, ocorre o abortamento floral e a

desuniformidade na abertura das flores torna-se evidente (Rena; Maestri, 1986; Carvalho, 2008; Barbosa *et al.*, 2016). O resultado é uma redução direta na taxa de fixação de frutos, comprometendo significativamente o potencial produtivo da safra subsequente. A identificação dos diferentes estádios fenológicos das gemas florais, especialmente do estágio E4, constitui importante ferramenta para o manejo hídrico e para a obtenção de floradas mais uniformes (Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025) (Figura 8).

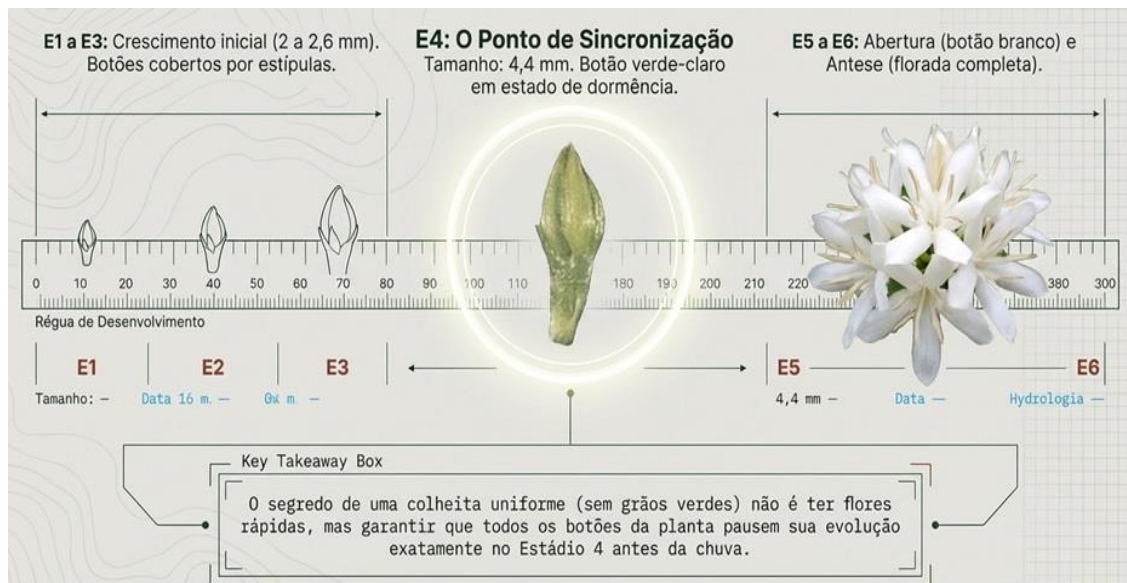


Figura 8. Escala fenológica das gemas florais do cafeeiro: evolução dos estádios E1 a E6 e importância do estágio E4 para a uniformização da florada. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Embora a escala fenológica permita identificar os momentos mais adequados para o manejo hídrico, a resposta das plantas ao déficit não é uniforme entre diferentes ambientes de cultivo e materiais genéticos. Investigações contemporâneas demonstram que a vulnerabilidade ao estresse hídrico é fortemente modulada pelo *terroir* e pela constituição genética das cultivares. Fatores como a altitude da lavoura, a capacidade de retenção de água do solo, as condições microclimáticas e o vigor da cultivar influenciam diretamente o limiar de tolerância das plantas à escassez de água, determinando a intensidade dos impactos sobre o crescimento, a floração e a produção do cafeeiro (Damatta *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2019; Nunes *et al.*, 2021; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

Fatores como a altitude da lavoura, a capacidade de retenção de água do solo e o vigor da cultivar definem o limiar de tolerância ao déficit (Ferreira *et al.*, 2019; Nunes *et al.*, 2021). Diante desse cenário, a adoção de práticas integradas, como a manutenção de cobertura morta sobre o solo, o manejo preciso da irrigação e a seleção de genótipos resilientes, deixa de ser uma escolha técnica para se tornar um compromisso com a sustentabilidade e a perenidade da produção cafeeira sob as incertezas climáticas atuais (Figura 9).

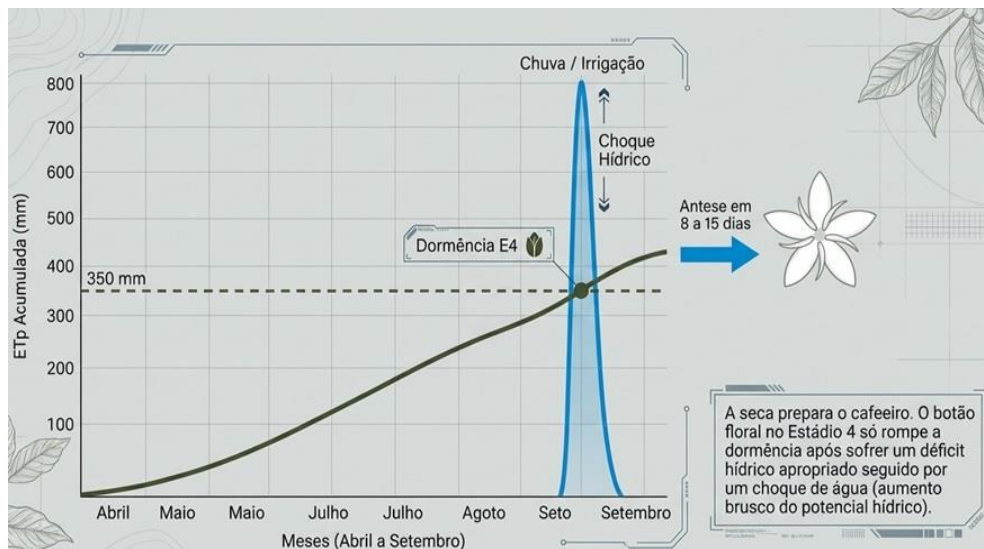


Figura 9. Dinâmica fisiológica da sincronização floral no cafeeiro: interação entre o estágio E4 e o estímulo hídrico. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A dinâmica apresentada na Figura 9 evidencia que o sucesso da florada depende não apenas da ocorrência do déficit hídrico, mas também de sua intensidade, duração e sincronização com o estágio fenológico das gemas florais. Quando as gemas atingem o estágio E4, a retomada da disponibilidade hídrica desencadeia uma rápida expansão celular, culminando na abertura uniforme das flores. Esse mecanismo constitui a base fisiológica da sincronização da florada e representa um dos principais fundamentos do manejo hídrico na cafeicultura moderna (Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

A uniformidade do florescimento proporciona vantagens agrônomicas significativas, incluindo maior homogeneidade no desenvolvimento dos frutos, melhor planejamento das práticas de manejo e maior eficiência das operações

de colheita. Além disso, a concentração da florada em um período mais curto tende a favorecer a uniformidade da maturação dos frutos, reduzindo a ocorrência de grãos em diferentes estádios de desenvolvimento na mesma planta. Como consequência, aumenta-se o potencial de obtenção de lotes com maior qualidade física e sensorial, aspecto particularmente relevante para a produção de cafés especiais.

4. Floração e antese

A floração do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) atinge seu ápice com a antese, fase que marca a abertura das flores e simboliza a quebra definitiva da dormência dos botões florais. Esse processo é orquestrado por um mecanismo fisiológico fascinante e, em certa medida, paradoxal. Durante o período de repouso, o estresse hídrico moderado atua como um modulador, suspendendo o crescimento das gemas em estágios avançados de maturação (notadamente E4) e impedindo florescimentos esparsos que comprometeriam a eficiência da colheita futura (Damatta *et al.*, 2007; Meireles *et al.*, 2009; Damatta *et al.*, 2019; Martins *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

Contudo, para esses mesmos autores, a transição para a antese exige uma mudança abrupta no *status* hídrico da planta. A entrada de água no sistema, seja por precipitação pluviométrica ou irrigação, reduz o potencial hídrico no xilema, permitindo que as células das pétalas aumentem sua turgidez de forma explosiva. Este influxo não apenas fornece o suporte físico para a expansão floral, mas também atua como o gatilho absoluto e imprescindível que reativa o metabolismo enzimático, culminando em uma florada exuberante e sincronizada. Essa vigorosa floração, capturada em momentos de rara beleza no campo, é a materialização da resiliência da planta frente ao manejo hídrico estratégico.

Além do estímulo hídrico, a eficiência da antese está diretamente associada ao estado fisiológico da planta e às condições ambientais vigentes no momento da reidratação. Temperaturas amenas, adequada disponibilidade de carboidratos acumulados nos ramos produtivos e bom estado nutricional favorecem a rápida expansão dos tecidos florais e aumentam a viabilidade do processo reprodutivo. Em contrapartida, condições de estresse prolongado,

associadas a temperaturas elevadas ou deficiências nutricionais, podem comprometer a abertura uniforme das flores e reduzir o potencial de pegamento dos frutos. Dessa forma, a antese representa não apenas a resposta imediata ao retorno da disponibilidade hídrica, mas também o resultado da interação entre fatores fisiológicos, nutricionais e ambientais acumulados ao longo do período de dormência (*ibidem*). A expressão visual desse processo pode ser observada na intensa florada apresentada na Figura 10, que evidencia a elevada capacidade de resposta fisiológica do cafeeiro após a retomada da disponibilidade hídrica.



Figura 10. Florada do cafeeiro após evento de precipitação, evidenciando a intensa emissão de flores ao longo dos ramos produtivos. Fonte: Acervo Fernanda Barcelos, 2022.

Durante o período de estresse hídrico que antecede este evento, os botões florais evoluem até atingir um estado de prontidão ou dormência. Essa restrição temporária atua como um ajuste biológico, garantindo que a planta concentre suas energias para uma resposta uniforme. Com o retorno das chuvas ou o acionamento da irrigação, a rápida absorção de água pelas raízes eleva a pressão de turgor nos tecidos florais, forçando a expansão das pétalas e consolidando a antese (Carvalho, 2008; Laviola *et al.*, 2020). Esse é o momento em que a lavoura se transforma, exalando o aroma característico que sinaliza o início de um novo ciclo produtivo (G6 e FL).

Contudo, a escassez de água neste momento crítico, ou imediatamente após, pode converter esse potencial em perda. A insuficiência hídrica durante a antese é um dos fatores mais limitantes para o cafeicultor, resultando em altos índices de abortamento floral e na baixa taxa de pegamento dos frutos. Um dos sintomas mais visíveis desse estresse é a formação de flores mal desenvolvidas e precocemente dessecadas, popularmente denominadas “estrelinhas”, que não possuem viabilidade para evoluir a frutos (Martins *et al.*, 2015; Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025). Esse fenômeno reduz drasticamente o número de frutos por roseta e compromete o potencial produtivo da safra, uma vez que a perda de flores viáveis diminui diretamente a capacidade de formação dos frutos, conforme ilustrado na Figura 11.



Figura 11. Efeito do déficit hídrico sobre a antese do cafeeiro: formação de flores atrofiadas (“estrelinhas”), associada à redução do pegamento floral e do potencial produtivo da lavoura. Fonte: Carvalho, 2023.

Os prejuízos decorrentes do déficit hídrico durante a antese extrapolam a simples redução do número de frutos formados. A perda de flores viáveis compromete a uniformidade da produção, intensifica a variabilidade no desenvolvimento dos frutos e pode aumentar a ocorrência de diferentes estádios de maturação na mesma planta. Além disso, a redução do pegamento floral limita o aproveitamento do potencial produtivo previamente construído durante as fases de indução e diferenciação das gemas, refletindo diretamente na produtividade final da lavoura. Em anos de estiagens prolongadas, esses efeitos

tendem a ser ainda mais expressivos, tornando a disponibilidade hídrica um dos principais fatores condicionantes do desempenho reprodutivo do cafeeiro (Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

Dessa forma, a gestão hídrica precisa deixar de ser apenas uma técnica de suporte para se tornar a garantia do sucesso reprodutivo. Em regiões marcadas pela instabilidade pluviométrica, o monitoramento rigoroso da umidade do solo e a adoção de estratégias de irrigação suplementar controlada são fundamentais para proteger a lavoura contra o abortamento e assegurar a sustentabilidade econômica e biológica da planta. Adicionalmente, práticas conservacionistas voltadas à manutenção da umidade do solo contribuem para aumentar a resiliência dos cafezais frente aos períodos de estiagem, reduzindo os riscos associados às oscilações climáticas (Ferreira *et al.*, 2019; Nunes *et al.*, 2021) (Figura 12).

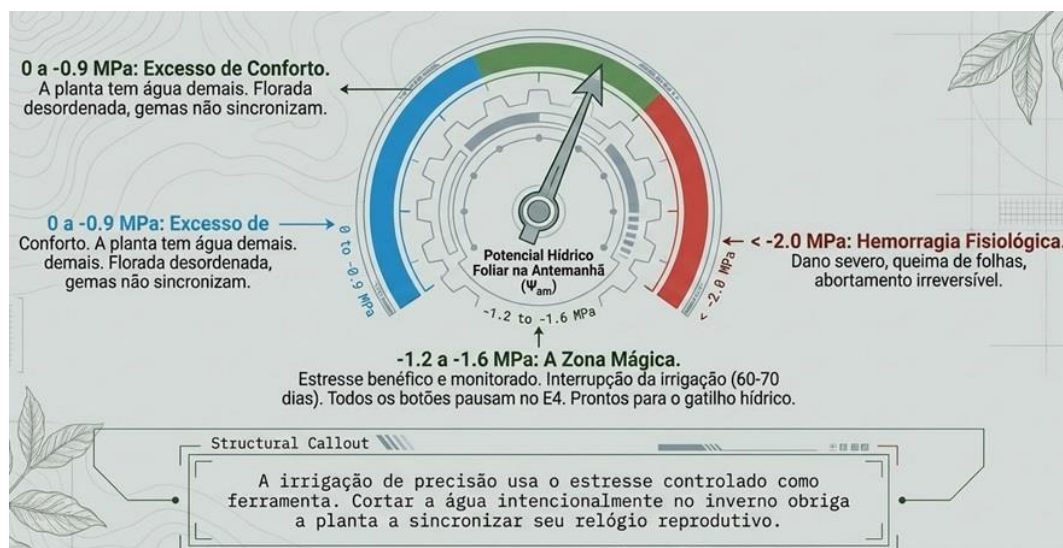


Figura 12. Diagnóstico e manejo: cenários de estresse hídrico *versus* o protocolo de irrigação deficitária controlada. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A análise comparativa dos cenários apresentados na Figura 12 evidencia que o sucesso reprodutivo do cafeeiro não reside na ausência total de estresse, mas sim no domínio de sua intensidade e temporalidade. Enquanto os cenários de déficit hídrico severo ou prolongado resultam em abortamento floral massivo e exaustão fisiológica dos ramos, a condição de água controlada demonstra o ápice da inteligência agrônoma.

Neste estado ideal, o estresse moderado é utilizado como um modulador biológico para sincronizar a antese, seguido por uma reposição hídrica precisa que garante a turgidez necessária para o vingamento inicial dos frutos. Assim, a transição entre o repouso induzido e a plena atividade metabólica torna-se o diferencial estratégico para mitigar a bienalidade e aperfeiçoar a partição de fotoassimilados em direção aos órgãos reprodutivos.

5. Granação inicial: fases de chumbinho e chumbão

Após a fecundação, o cafeeiro ingressa na terceira fase de seu ciclo reprodutivo, denominada granação inicial. Este período abrange os estágios de “chumbinho”, caracterizado pelo fruto recém-formado, e “chumbão”, momento em que ocorre a intensa expansão celular e o crescimento volumétrico do fruto. Nestas etapas, a água assume um papel de protagonista biológico, sendo o veículo indispensável para o transporte de fotoassimilados, a manutenção da turgidez celular e a definição da arquitetura final do fruto (Arruda; Grande, 2003; Alves, 2008; Silva *et al.*, 2018; Alves *et al.*, 2020).

Durante essa fase, o fruto passa por rápidas transformações morfofisiológicas que determinarão sua capacidade futura de acumular reservas e atingir adequado padrão de desenvolvimento. O sucesso desse processo depende da manutenção de um balanço favorável entre a produção de fotoassimilados pelas folhas e a capacidade dos frutos em formação de absorver e utilizar esses compostos. Simultaneamente, ocorre intensa atividade metabólica associada à síntese de novos tecidos, ao crescimento do pericarpo e à estruturação inicial do endosperma, tornando os frutos altamente dependentes do suprimento contínuo de água e nutrientes. Nesse período, os frutos passam a atuar como importantes drenos metabólicos, direcionando para si grande parte dos fotoassimilados produzidos pela planta. Como consequência, qualquer restrição hídrica pode comprometer a divisão e a expansão celular, reduzir o crescimento inicial dos frutos e limitar o potencial produtivo da lavoura (Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

Além do crescimento visível dos frutos, essa etapa é marcada por intensa reorganização fisiológica dos tecidos reprodutivos. Durante a formação inicial do

fruto, ocorre elevada demanda energética para sustentar os processos de divisão celular, diferenciação tecidual e estabelecimento das estruturas responsáveis pelo armazenamento futuro de reservas. Nesse contexto, a disponibilidade de água influencia diretamente a atividade fotossintética, o transporte de nutrientes e a manutenção do potencial de crescimento dos frutos. Alterações no balanço hídrico da planta podem reduzir a eficiência desses processos, comprometendo não apenas o desenvolvimento inicial dos frutos, mas também sua capacidade posterior de enchimento e acúmulo de matéria seca (Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025) (Figura 13).

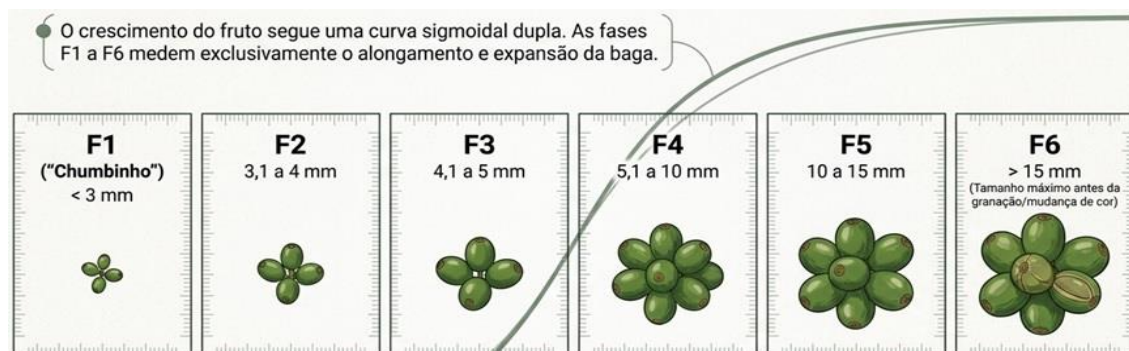


Figura 13. Desenvolvimento fenológico dos frutos do cafeeiro: evolução dos estádios de chumbinho, chumbão, expansão celular e granação (F1 a F6). Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A ocorrência de déficit hídrico neste intervalo é particularmente severa, pois coincide com a fase de rápida expansão celular do fruto, momento em que a turgidez hídrica é o motor do crescimento. Sob condições de estresse hídrico acentuado, o cafeeiro ativa mecanismos fisiológicos de defesa destinados à preservação de seus recursos metabólicos e hídricos. Essa resposta envolve alterações hormonais, especialmente o aumento da síntese de ácido abscísico e etileno, que favorecem a redução da carga reprodutiva da planta. Como consequência, ocorre a abscisão de parte dos frutos em formação, fenômeno que representa uma estratégia adaptativa para garantir a sobrevivência do organismo materno, embora resulte em perdas produtivas significativas (Damatta *et al.*, 2007; Damatta *et al.*, 2019; Laviola *et al.*, 2020; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

Os impactos do estresse hídrico sobre os frutos em formação não se restringem à redução do crescimento. Para esses mesmos autores, em

condições de deficiência de água, ocorrem diminuição da atividade fotossintética, da translocação de carboidratos e da absorção de nutrientes, comprometendo o suprimento energético necessário para sustentar o desenvolvimento dos frutos. Como resultado, a planta passa a priorizar a manutenção de suas funções vitais e intensifica mecanismos fisiológicos que favorecem a eliminação de parte dos frutos em formação. Essa resposta adaptativa, embora importante para a conservação dos recursos internos da planta, representa uma das principais causas de perdas produtivas durante a fase inicial de frutificação, sendo frequentemente observados pela queda prematura dos chamados “chumbinhos”, conforme ilustrado nas Figuras 14a e 14b.



Figuras 14a e 14 b. Efeitos do déficit hídrico durante a fase de chumbinho: sintomas de clorose, redução do vigor vegetativo e abscisão prematura de frutos em desenvolvimento. Fonte: (a) Notícias Agrícolas (2015); (b) elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (Google Gemini).

Além da queda prematura dos frutos, a escassez de água impõe limitações ao potencial de expansão volumétrica do fruto. Como o crescimento dos lóculos

e dos tecidos internos depende diretamente da manutenção da turgidez celular, a deficiência hídrica durante essa fase reduz a capacidade de expansão dos frutos e restringe a formação de estruturas destinadas ao acúmulo posterior de reservas. Como consequência, mesmo quando as condições ambientais se tornam mais favoráveis em fases subsequentes, o potencial de enchimento dos grãos já pode estar comprometido em razão das limitações estruturais estabelecidas durante o período crítico de expansão celular. O resultado é a formação de grãos menores, mal desenvolvidos e com menor valor comercial (Damatta *et al.*, 2007; Damatta *et al.*, 2019; Laviola *et al.*, 2020; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

Adicionalmente, a deficiência hídrica prejudica a formação adequada do pergaminho, a membrana que protege o endosperma. Uma falha estrutural nessa camada reflete negativamente não apenas na integridade física do grão, mas também na sua qualidade sensorial após o beneficiamento (Ferreira *et al.*, 2019; Nascimento *et al.*, 2021). Portanto, garantir a estabilidade hídrica durante as fases de chumbinho e chumbão é uma estratégia vital para assegurar que o potencial genético da cultivar se traduza em frutos bem formados e aptos a sustentar adequadamente os processos subsequentes de enchimento e acúmulo de reservas.

6. Enchimento do grão

A fase de enchimento do grão (Fase 4) representa o ápice da demanda metabólica no ciclo do *Coffea arabica* L., configurando-se como uma janela de extrema vulnerabilidade fisiológica. Nesse estágio, ocorre intenso acúmulo de matéria seca no endosperma, processo responsável pela formação da massa, densidade e composição química dos grãos. A água atua como o veículo indispensável para a translocação de minerais, açúcares e demais fotoassimilados sintetizados nas folhas em direção às sementes em desenvolvimento. É esse fluxo contínuo que sustenta o acúmulo de reservas e assegura a adequada formação dos grãos, influenciando diretamente seu tamanho, peso e qualidade final (Damatta *et al.*, 2007; Alves, 2008; Damatta *et al.*, 2019; Nascimento *et al.*, 2021; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

Durante esse período, os frutos atuam como os principais drenos metabólicos da planta, competindo intensamente pelos fotoassimilados produzidos nas folhas e pelas reservas acumuladas nos ramos produtivos. O sucesso do enchimento depende da manutenção de elevadas taxas fotossintéticas e da eficiência dos mecanismos de transporte no floema, que garantem o suprimento contínuo de compostos orgânicos necessários à formação do endosperma. Dessa forma, qualquer limitação na disponibilidade hídrica repercute diretamente sobre a capacidade da planta de sustentar o crescimento e o acúmulo de reservas nos frutos em desenvolvimento.

Sob estresse hídrico severo, os frutos, que atuam como drenos preferenciais, podem exaurir as reservas dos ramos produtivos, levando ao fenômeno do depauperamento. Nesse cenário de escassez, a planta passa a priorizar a manutenção de suas funções vitais e a sobrevivência celular em detrimento da deposição de sólidos solúveis nos grãos. As implicações são drásticas e multifatoriais: a interrupção desse aporte culmina na formação de grãos “chochos” ou de menor peneira e, simultaneamente, compromete a complexidade química da bebida (Ferreira *et al.*, 2019).

Além das perdas quantitativas, o déficit hídrico durante o enchimento dos grãos compromete atributos diretamente relacionados à qualidade física da produção. A redução do fluxo de fotoassimilados limita o acúmulo de matéria seca e reduz a densidade dos grãos, aumentando a ocorrência de sementes mal formadas, leves e com menor uniformidade. Esses efeitos repercutem negativamente sobre a classificação física do café, reduzindo o rendimento após o beneficiamento e a proporção de grãos retidos em peneiras superiores (Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

Em situações mais severas, para esses mesmos autores, o comprometimento do enchimento pode resultar na formação de grãos chochos, caracterizados pelo baixo peso específico e pela reduzida capacidade de expressão do potencial qualitativo da bebida, situação frequentemente observada em lavouras submetidas a déficit hídrico durante a fase de enchimento dos grãos.

As consequências do déficit hídrico durante o enchimento dos frutos são evidenciadas nas Figuras 15a e 15b, nas quais se observa a formação de grãos

mal desenvolvidos e chochos em comparação com grãos adequadamente preenchidos. Os reflexos da deficiência hídrica estendem-se também à composição química dos grãos. A limitação no transporte de açúcares, aminoácidos e compostos precursores dos atributos sensoriais interfere diretamente na formação do perfil químico responsável pelo aroma, sabor, doçura, acidez e equilíbrio da bebida (Damatta *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).



Figuras 15a e 15b. Efeitos do déficit hídrico durante a fase de enchimento dos grãos: formação de grãos mal desenvolvidos e “chochos” em comparação com grãos normais. Fonte: (a) Rehagro, 2025; e (b) elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (Google Gemini).

Consequentemente, mesmo quando a produtividade não é drasticamente reduzida, a qualidade final do café pode ser comprometida em razão das alterações ocorridas durante o enchimento dos frutos. Esses impactos evidenciam que a disponibilidade hídrica nessa fase influencia não apenas a quantidade produzida, mas também o valor agregado e a expressão do potencial

genético da cultivar na xícara (Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

Dessa forma, a manutenção de condições hídricas adequadas durante o enchimento dos grãos não apenas preserva a produtividade da lavoura, mas também constitui um fator determinante para a obtenção de cafés de elevada qualidade física e sensorial (Damatta *et al.*, 2007; Alves, 2008; Nascimento *et al.*, 2021).

Em cenários de estresse hídrico agudo e persistente, a planta pode manifestar a anomalia denominada “coração negro” (Figura 16). Esse fenômeno, resultante da necrose dos tecidos internos do grão, representa uma perda extremamente severa, pois compromete simultaneamente a qualidade física, o potencial sensorial e o valor comercial do café beneficiado (Ferreira *et al.*, 2019; Nascimento *et al.*, 2021).



Figura 16. Efeito do déficit hídrico severo sobre a qualidade dos grãos: ocorrência de “coração negro”, caracterizada pela necrose dos tecidos internos e pela perda do valor físico e sensorial do café. Fonte: Notícias Agrícolas, 2014.

Em situações nas quais o déficit hídrico se prolonga por períodos extensos e coincide com fases críticas do desenvolvimento dos frutos, os danos deixam de se restringir à redução do enchimento dos grãos e passam a comprometer a

integridade dos tecidos internos. A intensa limitação do fluxo de água e nutrientes para os frutos provoca desequilíbrios metabólicos, acelera processos degenerativos e favorece a morte celular em regiões específicas da semente. Como consequência, surgem alterações fisiológicas irreversíveis que comprometem severamente a qualidade física e sensorial do café, tornando os defeitos perceptíveis mesmo após o beneficiamento e a torrefação.

Adicionalmente aos danos estruturais, a escassez de água compromete a composição fitoquímica da semente, alterando elementos essenciais para a qualidade final. Compostos precursores do sabor e aroma, como lipídios, açúcares redutores e ácidos clorogênicos, têm sua síntese e acúmulo comprometidos sob estresse (Rocha *et al.*, 2018; Laviola *et al.*, 2020). O resultado é uma bebida com perfil sensorial empobrecido, privando o produtor do acesso aos mercados de cafés especiais. Portanto, a manutenção de níveis ótimos de umidade no solo durante o enchimento não é apenas uma medida de produtividade, mas um ato de preservação da essência e da qualidade que definem a cafeicultura de excelência.

7. Maturação dos frutos

A fase de maturação caracteriza-se por uma série de transformações bioquímicas responsáveis pela consolidação da qualidade final do café. Nesse período, ocorre degradação gradual da clorofila, síntese e acúmulo de pigmentos, alterações na composição da mucilagem e intensificação do metabolismo de compostos associados ao aroma e ao sabor da bebida. Paralelamente, os frutos aproximam-se do estágio cereja, considerado ideal para a colheita de cafés de maior qualidade. A uniformidade desse processo é fundamental para garantir lotes homogêneos e maximizar o potencial físico e sensorial da produção (Laviola *et al.*, 2020; Nascimento *et al.*, 2021) (Figura 17).

A desuniformidade da maturação constitui uma das consequências mais frequentes do déficit hídrico durante a fase final de desenvolvimento dos frutos. A ocorrência de períodos de estresse hídrico alternados com chuvas ou irrigações tardias pode estimular sucessivas floradas e gerar diferentes ciclos reprodutivos dentro da mesma lavoura. Como resultado, frutos originados em

momentos distintos passam a coexistir na planta, apresentando ritmos diferenciados de crescimento e maturação. Esse descompasso fenológico compromete a uniformidade da colheita e reduz a eficiência das operações de pós-colheita, tornando mais difícil a obtenção de lotes homogêneos e de elevada qualidade.



Figura 17. Desenvolvimento fenológico da maturação dos frutos do cafeeiro (M1 a M5): evolução dos estádios do fruto verde ao maduro e identificação do ponto ideal de colheita (M3). Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A escassez hídrica nesta etapa final compromete, primordialmente, a homogeneidade do processo. Sob estresse, a planta perde a capacidade de sincronizar a maturação de seus frutos, resultando em ramos que exibem, simultaneamente, frutos em estágios de “verde”, “cereja” e “passa” (Figura 18). Para o cafeicultor, esse descompasso fenológico é um desafio logístico e econômico: ele impõe uma colheita com alta variabilidade, o que dificulta o processamento pós-colheita, eleva o índice de defeitos e, por consequência, reduz o rendimento líquido e a rentabilidade da safra (Alves, 2008; Ferreira *et al.*, 2019; Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

A Figura 18 materializa uma das principais consequências do déficit hídrico sobre a dinâmica fenológica do cafeeiro: a desuniformidade da maturação dos frutos. Como discutido anteriormente, períodos de estresse hídrico sem o devido controle agrônomo podem desencadear sucessivas floradas e diferentes ciclos de desenvolvimento reprodutivo ao longo da mesma

safrá. Como resultado, observa-se a coexistência de frutos verdes, cereja e passa no mesmo ramo, caracterizando um quadro de elevada heterogeneidade fenológica. Essa falta de uniformidade não apenas eleva os custos operacionais da colheita seletiva, mas também compromete a qualidade do lote, uma vez que a presença de frutos em diferentes estágios de maturação interfere diretamente na composição química dos grãos, na eficiência da secagem e na padronização sensorial da bebida.



Figura 18. Desuniformidade da maturação dos frutos do cafeeiro em decorrência do déficit hídrico, evidenciando a coexistência de frutos verdes, cereja e passa no mesmo ramo produtivo. Fonte: Cafeicultura, 2010.

Além dos obstáculos operacionais, a maturação desuniforme é um entrave à excelência sensorial. A presença de frutos colhidos fora do ponto ideal, seja pela imaturidade ou pelo excesso de seca no pé, introduz notas indesejadas de adstringência, sabores herbáceos ou fermentações descontroladas na bebida (Rocha *et al.*, 2018). Nesse sentido, a gestão hídrica criteriosa até as vésperas da colheita, aliada ao uso de indicadores precisos de maturação e ao

planejamento do escalonamento, não são apenas práticas de manejo, mas estratégias essenciais para preservar o potencial qualitativo que a planta construiu ao longo de todo o ano.

8. Estratégias para mitigação dos efeitos do déficit hídrico

A compreensão da dinâmica hídrica no cafeeiro revela que a deficiência de água não deve ser vista apenas como um fator limitante, mas como uma variável de manejo. Em momentos específicos, como na fase de indução floral e diferenciação de gemas (Fase 2), o estresse hídrico leve e controlado atua como um gatilho fisiológico fundamental. Essa “sede estratégica” promove uma florada mais uniforme e concentrada, o que simplifica o manejo e potencializa a produtividade da safra (Meireles *et al.*, 2009; Ferreira *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

Entretanto, a linha entre o estímulo positivo e o dano severo é tênue. Qualquer intensificação ou prolongamento imprevisto do estresse pode desencadear perdas em cascata, especialmente nas fases de granação inicial (Fase 3) e enchimento do grão (Fase 4). Nesses estágios, a planta é altamente dependente da água para o transporte de fotoassimilados, para a expansão celular dos frutos e para a biossíntese dos compostos responsáveis pela qualidade física e sensorial da bebida. Diante dessa sensibilidade fisiológica, a cafeicultura moderna exige a implantação de estratégias robustas de mitigação e adaptação às oscilações climáticas.

Além da irrigação, a mitigação dos efeitos do déficit hídrico envolve um conjunto integrado de práticas conservacionistas voltadas à ampliação da resiliência dos sistemas cafeeiros. Entre elas destacam-se a manutenção da cobertura vegetal nas entrelinhas, o uso de plantas de cobertura, a incorporação de matéria orgânica ao solo, a redução da evaporação superficial e a adoção de sistemas agroflorestais capazes de melhorar o microclima da lavoura. Essas estratégias contribuem para aumentar a infiltração e o armazenamento de água no solo, reduzindo a vulnerabilidade dos cafeeiros durante os períodos de estiagem (Souza, 2026e).

Nesse contexto, as tecnologias de irrigação localizada, como o gotejamento e a microaspersão, consolidam-se como ferramentas de precisão. Elas permitem ao gestor aplicar lâminas de água adequadas diretamente na zona radicular ativa, minimizando perdas por evaporação e garantindo que a planta atravesse os períodos críticos sem entrar em exaustão fisiológica (Figura 19).

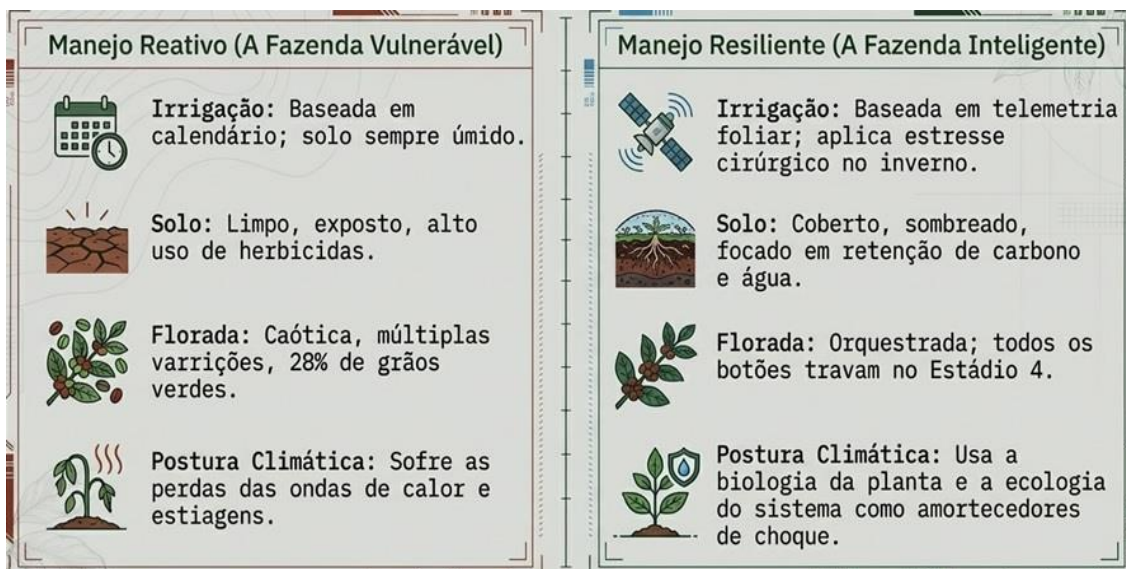


Figura 19. Da vulnerabilidade climática à cafeicultura inteligente: integração entre monitoramento, irrigação de precisão e manejo hídrico estratégico para mitigação dos efeitos do déficit hídrico. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Associadas ao monitoramento da umidade do solo, ao uso de sensores e às ferramentas de agricultura digital, essas tecnologias representam um dos pilares da chamada cafeicultura inteligente, na qual as decisões de manejo passam a ser fundamentadas em informações climáticas e fisiológicas em tempo real (Ferreira *et al.*, 2019; Mantovani; Soares; Bernardo, 2021)

Complementarmente, o manejo conservacionista do solo emerge como um pilar de sustentabilidade e resiliência. A manutenção de coberturas vegetais, sejam elas vivas ou mortas, como braquiárias e leguminosas, cria um microclima favorável, reduzindo a temperatura do solo e aumentando sua capacidade de retenção hídrica (Cunha *et al.*, 2022; Souza, 2026e). Esse aporte contínuo de matéria orgânica melhora as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, favorecendo a infiltração da água, reduzindo perdas por escoamento superficial e ampliando o armazenamento hídrico no perfil explorado pelas raízes.

Além da conservação da umidade, a cobertura permanente do solo estimula a atividade microbiológica, favorece a formação e estabilidade dos agregados e reduz significativamente os processos erosivos. Como consequência, o sistema radicular do cafeeiro passa a explorar um ambiente mais equilibrado e biologicamente ativo, aumentando sua eficiência na absorção de água e nutrientes. Em cenários de irregularidade pluviométrica, essas condições contribuem para reduzir os impactos dos veranicos e aumentar a estabilidade produtiva das lavouras (*ibidem*).

Além dos benefícios proporcionados pela cobertura permanente do solo, estratégias integradas de manejo, como a arborização dos cafezais e os sistemas agroflorestais, ampliam a capacidade de conservação hídrica e de regulação microclimática. A presença de árvores reduz a incidência direta da radiação solar, atenua as oscilações térmicas e contribui para a manutenção de condições mais favoráveis ao desenvolvimento do cafeeiro durante períodos de déficit hídrico (*ibidem*) (Figura 20).



Figura 20. Integração café-árvore como estratégia de adaptação climática: conservação da água, regulação microclimática e resiliência dos sistemas cafeeiros. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Os benefícios dessas práticas transcendem a simples conservação da água. A integração entre cobertura do solo, matéria orgânica, biodiversidade

funcional e manejo nutricional equilibrado fortalece os mecanismos fisiológicos de adaptação das plantas ao estresse hídrico. Dessa forma, sistemas cafeeiros conduzidos sob princípios conservacionistas apresentam maior capacidade de resistência e recuperação frente aos eventos climáticos extremos, constituindo uma importante estratégia de adaptação às mudanças climáticas e de fortalecimento da sustentabilidade da cafeicultura.

No planejamento de novas áreas, a dimensão genética assume um papel determinante na construção da resiliência. A seleção de cultivares desenvolvidas especificamente para a tolerância à seca, fruto de avançados programas de melhoramento, assegura não apenas uma maior eficiência no uso da água, mas a estabilidade produtiva necessária para enfrentar a irregularidade das chuvas (Carvalho, 2008; Nunes *et al.*, 2021).

Complementarmente, a integração de geotecnologias e o monitoramento remoto elevam o patamar da gestão agrônoma. Por meio de sensores espectrais, *drones* e imagens de satélite, torna-se possível identificar o estresse hídrico em sua fase silenciosa, antes mesmo da manifestação de sintomas visíveis a olho nu. Ao associar esse diagnóstico precoce a modelos de previsão climática, o produtor deixa de ser um observador passivo das intempéries para tornar-se um estrategista, transformando o que seria uma resposta reativa em uma gestão preventiva e adaptativa (Gontijo *et al.*, 2020).

9. Agroecologia: da mitigação do estresse hídrico à construção de agroecossistemas resilientes

A agroecologia, enquanto ciência e prática integradora que aplica princípios ecológicos à agricultura, oferece um caminho robusto para a mitigação dos impactos do déficit hídrico no cafeeiro (*Coffea arabica* L.). Seus fundamentos transcendem o manejo isolado da planta, priorizando a recuperação da saúde do ecossistema e o fortalecimento da resiliência das lavouras. Entre as práticas centrais, destaca-se a manutenção de coberturas vegetais permanentes, como braquiárias e leguminosas, que reduzem a evaporação direta do solo, favorecem a infiltração da água da chuva e melhoram a porosidade biológica. Como resultado, promove-se maior retenção de umidade e maior estabilidade hídrica

no sistema produtivo (Altieri, 2009; Cunha *et al.*, 2022; Souza, 2025; Souza, 2026e; Sousa *et al.*, 2026).

A revitalização do solo por meio da adubação orgânica e da adubação verde constitui um pilar estratégico para a sustentabilidade do sistema produtivo. Ao elevar os teores de matéria orgânica, essas práticas promovem melhorias na estrutura do solo, ampliando sua capacidade de retenção hídrica e reduzindo os efeitos da compactação. Nesse contexto, o solo deixa de atuar apenas como suporte mecânico e passa a exercer importante função reguladora, favorecendo a eficiência do uso da água e contribuindo para o suprimento hídrico das plantas durante períodos de estiagem (Silva; Souza, 2021; Souza, 2026b) (Figura 21).



Figura 21. Relação entre qualidade biológica do solo, desenvolvimento radicular e resiliência hídrica do cafeeiro em sistemas agroecológicos. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Além dos benefícios físicos proporcionados ao solo, os sistemas agroecológicos favorecem o restabelecimento de processos ecológicos essenciais à estabilidade hídrica dos agroecossistemas. O aumento da biodiversidade vegetal estimula a atividade da fauna edáfica e dos microrganismos do solo, intensificando a ciclagem de nutrientes, a formação de agregados estáveis e o desenvolvimento de sistemas radiculares mais profundos. O incremento da matéria orgânica também melhora a infiltração e a retenção de água, fortalecendo a capacidade adaptativa dos cafeeiros frente aos períodos de restrição hídrica.

Como consequência, ocorre maior exploração do perfil do solo pelas raízes e ampliação da capacidade de absorção de água durante períodos de baixa disponibilidade hídrica. Essa interação entre solo, plantas e organismos vivos constitui um dos principais mecanismos pelos quais a agroecologia fortalece a resiliência dos sistemas cafeeiros frente aos eventos climáticos extremos. Dessa forma, a qualidade biológica do solo deixa de ser apenas um indicador ecológico e passa a representar um componente estratégico para a sustentabilidade e a estabilidade produtiva da cafeicultura.

Adicionalmente, o sombreamento estratégico em sistemas agroflorestais desempenha um papel vital na regulação térmica e hídrica da lavoura. A presença de espécies arbóreas atua como um escudo pedológico, atenuando a incidência da radiação solar direta sobre o dossel do cafeeiro e reduzindo a taxa de evapotranspiração. Esse arranjo eleva a umidade relativa no microclima, protegendo a integridade fisiológica da planta precisamente nas fases de maior vulnerabilidade reprodutiva (Laviola *et al.*, 2020; Mogor *et al.*, 2020).

Essa configuração sistêmica extrapola a proteção imediata, promovendo uma estabilidade funcional que favorece a longevidade dos ramos produtivos. Ao suavizar os picos de temperatura foliar, o sistema agroflorestal evita o fechamento estomático precoce nas horas de maior demanda evaporativa, permitindo que a planta mantenha sua atividade fotossintética por períodos mais prolongados. Essa harmonia entre a biologia do solo e a arquitetura do sistema é o que define a verdadeira engenharia de resiliência, transformando a paisagem agrícola em um ecossistema produtivo capaz de autorregular-se frente aos desafios do novo normal climático (Altieri; Nicholls, 2017; Salvador *et al.*, 2025).

Inversamente, para esses mesmos autores, a desconsideração desses processos ecossistêmicos expõe a cafeicultura a elevados níveis de vulnerabilidade ambiental e produtiva. Em sistemas de monocultivo a pleno sol e solos desprovidos de cobertura vegetal, a ausência de mecanismos biológicos de regulação favorece a degradação da matéria orgânica, a compactação superficial e a redução da infiltração de água no perfil do solo.

Como consequência, ocorre menor disponibilidade hídrica para as raízes, aumento da temperatura edáfica e redução da atividade biológica, comprometendo processos fundamentais para o desenvolvimento do cafeeiro.

Nesse cenário de fragilidade agroecológica, períodos de veranico tendem a desencadear respostas fisiológicas mais intensas, ampliando os riscos de estresse hídrico, redução do crescimento vegetativo, comprometimento da formação de gemas florais e diminuição do potencial produtivo da safra subsequente (Figura 22).



Figura 22. Vulnerabilidade hídrica em sistemas cafeeiros degradados: efeitos da baixa matéria orgânica e da degradação estrutural do solo sobre a retenção de água e a saúde do cafeeiro. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Nesse sentido, a diversificação biológica inerente aos consórcios agroecológicos atua como uma estratégia de alívio da pressão hídrica sobre o sistema. Ao promover o equilíbrio ecológico e o controle natural de pragas, a agroecologia reduz a dependência de insumos externos e intervenções químicas que, muitas vezes, elevam o estresse metabólico da planta e, consequentemente, sua demanda por água. Assim, o manejo da biodiversidade deixa de ser um componente meramente ambiental para tornar-se um regulador da eficiência hídrica e da resiliência econômica do produtor (Altieri; Nicholls, 2017; Salvador *et al.*, 2025).

Soma-se a essa engenharia de resiliência a valorização do saber local e a seleção participativa de variedades adaptadas às especificidades de cada território. Esse processo transcende a simples escolha técnica, configurando-se

como um resgate da soberania genética do produtor. Ao invés de depender exclusivamente de pacotes tecnológicos padronizados, a seleção participativa permite que o cafeicultor identifique, em seu próprio ecossistema, os genótipos que demonstram maior rusticidade e estabilidade produtiva sob as condições reais de estresse hídrico e variações térmicas regionais (Caporal; Costabeber, 2004; Machado; Machado Filho, 2014; Gliessman, 2015; Souza, 2026b).

Essa abordagem promove uma produção mais autônoma e harmonizada com as realidades climáticas, uma vez que as variedades selecionadas localmente carregam uma “memória de adaptação” ao bioma. Diferente das cultivares de alto desempenho em ambientes controlados, os materiais rústicos priorizam o equilíbrio metabólico e o vigor radicular, garantindo a perenidade da lavoura mesmo em cenários de incerteza climática. Assim, a integração entre o conhecimento empírico do cafeicultor e os princípios da agroecologia transforma o território em um laboratório vivo, onde a diversidade genética atua como o principal ativo de segurança econômica e ambiental (Souza, 2026e).

Sob essa perspectiva, a resiliência hídrica deixa de ser interpretada como uma característica isolada da planta e passa a ser compreendida como uma propriedade emergente do agroecossistema. A interação entre diversidade genética, qualidade biológica do solo, cobertura vegetal permanente e conhecimento local gera mecanismos complementares de adaptação capazes de reduzir os impactos das oscilações climáticas.

Em vez de depender exclusivamente de insumos externos para corrigir desequilíbrios ambientais, os sistemas agroecológicos fortalecem processos naturais de autorregulação, tornando a produção mais estável, eficiente e sustentável ao longo do tempo. Essa visão sistêmica evidencia que a segurança hídrica da cafeicultura está diretamente relacionada à capacidade do agroecossistema de conservar biodiversidade, reciclar nutrientes e manter sua funcionalidade ecológica diante das adversidades climáticas (Figura 23).

A lógica agroecológica de manejo da água não se limita à conservação da umidade no solo ou à redução das perdas por evaporação. Ela incorpora uma visão integrada da paisagem, na qual a água da chuva é compreendida como um recurso estratégico que deve ser captado, armazenado e utilizado de forma racional dentro do próprio agroecossistema. Nesse contexto, práticas voltadas à

infiltração da água no solo, à recarga dos aquíferos e à redução do escoamento superficial tornam-se componentes fundamentais para a construção da segurança hídrica das propriedades rurais. Além de reduzirem a vulnerabilidade dos cultivos durante os períodos de estiagem, essas estratégias contribuem para a conservação dos recursos hídricos em escala de microbacia, fortalecendo simultaneamente a sustentabilidade produtiva e ambiental dos territórios cafeeiros (Souza, 2018).

Estratégia	Retenção Hídrica	Ciclagem Nutricional	Impacto Ambiental
Vegetação Espontânea 	Baixa / Média (Compete na seca)	Média (Adiciona Nitrogênio)	Positivo
Filme de Polietileno (Mulching) 	Altíssima (Bloqueia evaporação)	Nula	Passivo ambiental (Geração de resíduos)
Braquiária (Urochloa decumbens) 	Alta	Altíssima (Aumenta o potássio em até 50%)	Extremamente Positivo (Biomassa contínua)

Figura 23. Manejo conservacionista e resiliência hídrica na cafeicultura: análise comparativa da vegetação espontânea, do filme de polietileno e da braquiária quanto à retenção de água, ciclagem nutricional e sustentabilidade ambiental. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

No campo das soluções hídricas, a agroecologia incorpora tecnologias sociais de gestão da água de baixo impacto e alta eficiência, como a construção de cisternas e barraginhas para a captação e armazenamento de águas pluviais (Figura 24). Essas estruturas, aliadas ao monitoramento atento e empírico do clima pelo produtor, criam uma rede de segurança contra períodos de escassez prolongada (Nora *et al.*, 2015; Menon *et al.*, 2025). Assim, a abordagem agroecológica não apenas propõe técnicas de sobrevivência à seca, mas promove uma gestão integrada e ética dos recursos naturais, fundindo ciência e tradição para assegurar o futuro da cafeicultura frente às incertezas globais.



Figura 24. Tecnologias socioambientais para conservação da água: contribuição de barraginhas e cochinchos para a infiltração, retenção hídrica e recarga de aquíferos em Atílio Vivácqua, Espírito Santo. Fonte: Acervo Márcio Menon, 2025.

As tecnologias socioambientais de conservação da água demonstram que a resiliência hídrica da cafeicultura depende da integração entre práticas de manejo, conservação dos recursos naturais e planejamento territorial. Entretanto, mesmo em sistemas conduzidos sob princípios agroecológicos, a capacidade de resposta da lavoura aos eventos climáticos extremos permanece condicionada às características genéticas das plantas cultivadas. Nesse contexto, a escolha de cultivares adaptadas às condições edafoclimáticas locais assume papel estratégico, complementando os benefícios proporcionados pelo manejo conservacionista e ampliando a capacidade dos cafezais de suportar períodos prolongados de deficiência hídrica sem perdas expressivas de produtividade e qualidade.

10. Cultivares de café com maior resiliência ao estresse hídrico

A seleção de cultivares geneticamente adaptadas a regimes de restrição hídrica constitui uma das estratégias mais eficazes para assegurar a sustentabilidade da cafeicultura moderna. Em um cenário de alta variabilidade climática, o avanço dos programas de melhoramento genético no Brasil tem sido

um divisor de águas, permitindo a obtenção de materiais de *Coffea arabica* que aliam a tolerância à seca à alta produtividade e a excelência sensorial.

Dentre os materiais de destaque, as cultivares “Catucaí Amarelo 2SL”, “Acauã”, “Siriema” e “Araponga MG1” têm demonstrado um desempenho agrônômico superior sob déficit hídrico moderado. Essa resiliência não é fruto do acaso, mas de adaptações morfofisiológicas específicas: sistemas radiculares mais profundos e ramificados, mecanismos de fechamento estomático mais eficientes e uma maior capacidade de recuperação da hidratação tecidual (Carvalho, 2008; Ramalho *et al.*, 2014).

A cultivar “Acauã”, por exemplo, consolidou-se em regiões de Cerrado e no semiárido brasileiro devido à sua notável estabilidade produtiva mesmo em anos de pluviosidade escassa. Paralelamente, o “Catucaí 2SL” destaca-se por harmonizar a tolerância ao estresse com uma maturação uniforme, característica que o torna ideal para sistemas agroecológicos e consórcios, onde o manejo da luz e da água é mais complexo (Martins *et al.*, 2015). Já o “Siriema” é reconhecido por sua rusticidade e vigor vegetativo, apresentando-se como uma opção segura para áreas de sequeiro e altitudes intermediárias.

Adicionalmente, materiais como o “IAC 125 RN” e o “IAC Obatã 1669-20” têm comprovado sua adaptabilidade a sistemas com baixa disponibilidade hídrica, sendo recomendados para lavouras que utilizam irrigação de precisão ou estratégias de déficit controlado (Carvalho *et al.*, 2010).

Entretanto, o potencial genético de uma cultivar somente se expressa plenamente quando associado a condições ambientais favoráveis e a práticas de manejo adequadas. Os avanços obtidos pelos programas de melhoramento genético evidenciam que a adaptação às condições de déficit hídrico não depende exclusivamente do aumento da produtividade ou da tolerância fisiológica das plantas. A estabilidade produtiva em ambientes sujeitos à irregularidade climática resulta da interação contínua entre o potencial genético da cultivar, as características ambientais do local de cultivo e as práticas de manejo adotadas pelo produtor (Carvalho, 2008; DaMatta *et al.*, 2018; Ferrão *et al.*, 2019).

Dessa forma, cultivares reconhecidas por sua rusticidade tendem a expressar melhor seu desempenho quando cultivadas em solos bem estruturados, com adequada disponibilidade de matéria orgânica e sob sistemas de manejo que favoreçam a conservação da água. Essa interação sinérgica entre genética, ambiente e manejo constitui a base para a construção de sistemas cafeeiros mais resilientes e sustentáveis frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas (Figura 25).



Figura 25. Construção da resiliência na cafeicultura: a interação entre genética, ambiente e manejo como determinante da tolerância ao déficit hídrico. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Para que o potencial de tolerância se manifeste plenamente, a escolha do material deve estar intrinsecamente ligada a um manejo conservacionista que preserve a saúde do solo e a eficiência hídrica. A genética oferece o alicerce, mas é o manejo atento que garante a resiliência e a longevidade da lavoura frente aos desafios ambientais. Nessa perspectiva, a tolerância à seca deixa de ser compreendida como uma característica isolada do DNA da cultivar e passa a ser interpretada como o resultado da interação dinâmica entre genética, ambiente e manejo, constituindo uma propriedade emergente de agroecossistemas equilibrados e resilientes (Carvalho, 2008; DaMatta *et al.*, 2018; Ferrão *et al.*, 2019).

Para esses mesmos autores, a interação entre as raízes profundas de materiais geneticamente melhorados e a estrutura porosa de solos ricos em

matéria orgânica cria uma rede de segurança que mitiga as flutuações extremas de disponibilidade hídrica. É esta sinergia que permite ao cafeicultor não apenas sobreviver aos eventos climáticos adversos, mas manter a estabilidade econômica e a qualidade sensorial de sua produção. Portanto, a transição para uma cafeicultura regenerativa exige que o produtor atue como gestor de agroecossistemas complexos, integrando inovação tecnológica, melhoramento genético e práticas conservacionistas capazes de fortalecer a resiliência hídrica, a estabilidade produtiva e a sustentabilidade da atividade cafeeira no longo prazo.

11. Considerações

O déficit hídrico consolida-se como um dos fatores ambientais de maior influência sobre a ontogenia do cafeeiro (*Coffea arabica* L.), atuando diretamente sobre os processos fisiológicos, reprodutivos e produtivos que determinam o desempenho da cultura. Ao longo das diferentes fases fenológicas, a disponibilidade de água exerce funções específicas e indispensáveis, influenciando desde a diferenciação das gemas florais até a formação, o enchimento e a maturação dos frutos. Esta revisão demonstrou que a relação entre o cafeeiro e o regime hídrico é complexa e multifacetada, exigindo uma compreensão integrada dos mecanismos fisiológicos que regulam o desenvolvimento da planta.

Os resultados apresentados evidenciam que a sensibilidade ao déficit hídrico varia conforme o estágio fenológico. Enquanto restrições hídricas moderadas e controladas podem desempenhar papel positivo na uniformização da florada, déficits prolongados ou intensos comprometem severamente os processos de frutificação e enchimento dos grãos. O abortamento floral, a queda de chumbinhos, a redução do crescimento dos frutos, a formação de grãos chochos e a ocorrência de anomalias fisiológicas, como o “coração negro”, constituem manifestações claras dos impactos do estresse hídrico sobre a produtividade e a qualidade do café.

Além das perdas quantitativas, os efeitos da deficiência hídrica repercutem diretamente sobre a qualidade física e sensorial da bebida. A limitação na

translocação de fotoassimilados e compostos precursores do aroma interferem na formação do perfil químico dos grãos, reduzindo atributos como doçura, acidez, complexidade aromática e equilíbrio sensorial. Da mesma forma, a desuniformidade da maturação compromete a eficiência da colheita e do processamento pós-colheita, dificultando a obtenção de lotes homogêneos e de elevado valor agregado.

Diante desse cenário, a adaptação da cafeicultura aos novos desafios climáticos exige uma abordagem integrada, capaz de combinar tecnologias modernas e princípios ecológicos. Estratégias como irrigação localizada, monitoramento da umidade do solo, uso de sensores, geotecnologias e ferramentas de agricultura digital ampliam a capacidade de diagnóstico e permitem uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos. Paralelamente, práticas conservacionistas, como a manutenção de coberturas vegetais, a adubação verde, o incremento da matéria orgânica, os sistemas agroflorestais e as tecnologias sociais de captação de água, fortalecem a capacidade de retenção hídrica dos agroecossistemas e reduzem sua vulnerabilidade frente aos períodos de estiagem.

A agroecologia emerge, nesse contexto, não apenas como um conjunto de práticas, mas como uma estratégia de reconstrução da resiliência dos sistemas cafeeiros. Ao promover a biodiversidade funcional, a conservação do solo, a valorização dos conhecimentos locais e a gestão integrada da paisagem, essa abordagem amplia a capacidade adaptativa das propriedades rurais e fortalece a sustentabilidade ambiental, social e econômica da atividade.

Adicionalmente, os avanços dos programas de melhoramento genético demonstram que a seleção de cultivares adaptadas às condições de déficit hídrico representa um importante componente da estratégia de adaptação climática. Entretanto, a tolerância à seca não deve ser compreendida como uma característica isolada do material genético, mas como o resultado da interação dinâmica entre genótipo, ambiente e manejo. A estabilidade produtiva e a qualidade da bebida dependem da sinergia entre cultivares adequadas, solos saudáveis, disponibilidade hídrica e práticas de manejo compatíveis com as condições locais.

Dessa forma, é possível concluir que a construção de uma cafeicultura resiliente demanda uma visão sistêmica, na qual água, solo, biodiversidade, genética e gestão atuam de forma integrada. Em um cenário marcado pela crescente frequência de eventos climáticos extremos, a sustentabilidade da produção cafeeira dependerá da capacidade dos produtores e das instituições de pesquisa em promover sistemas produtivos mais eficientes, regenerativos e adaptados às novas condições ambientais. Mais do que um desafio agrônômico, a gestão hídrica passa a representar um compromisso estratégico com a segurança alimentar, a conservação dos recursos naturais, a competitividade da cafeicultura brasileira e o futuro das regiões produtoras.

12. Referências

AGROADVANCE. **Colheita de café**: tudo o que você precisa saber. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-colheita-de-cafe/>. Acesso em: 2 abr. 2024.

ALMEIDA, S. R. de; ALMEIDA, A. R. de; RIBEIRO, M. de F.; SILVA, M. A. V.; CARVALHO, G. R. Fenologia do cafeeiro: aplicações e perspectivas para a cafeicultura brasileira. **Cadernos de Agroecologia**, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 1-8, 2016.

ALTIERI, M. A. **Agroecologia**: bases científicas para uma agricultura sustentável. 3. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2009.

ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I. **Agroecologia e os princípios da agricultura sustentável**. São Paulo: Expressão Popular, 2017.

ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I.; HENAO, A.; LANA, M. A. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. **Agronomy for sustainable development**, v. 35, n. 3, p. 869-890, 2015.

ALVES, E. R.; SILVA, T. M. da; SOUZA, F. A. de; SANTOS, R. C. dos. Impact of water deficit on the development and chemical composition of coffee fruits. **Journal of Agricultural Science**, [S. l.], v. 12, n. 4, p. 88-102, 2020.

ALVES, H. M. R.; SILVA, T. M. da; SOUZA, F. A. de; SANTOS, R. C. dos. Ecofisiologia do cafeeiro arábica sob estresse hídrico. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [S. l.], v. 50, e61552, p. 1-9, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632020v5061552>.

ALVES, H. M. R. Impacto do déficit hídrico em fases fenológicas do cafeeiro. **Informe Agropecuário**, v. 29, n. 253, p. 36-45, 2008.

ALVES, J. D. Morfologia do Cafeeiro. In: CARVALHO, C. H. S. (Org.). **Cultivares de Café**. Varginha, MG: EMBRAPA, 2008. p. 31-48. Disponível em:

http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/publicacoes_tecnicas/Livro_Cultivares.pdf. Acesso em: 24 jul. 2025.

ARRUDA, F. B.; GRANDE, M. A.. Fator de resposta da produção do cafeeiro ao déficit hídrico em Campinas. **Bragantia**, v. 62, n. 1, p. 139-145, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052003000100017>. Acesso em: 18 jun. 2025.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; ZULLO JUNIOR, J.; AVILA, A. M. H. de; EVANGELISTA, B. A.; MARIN, F. R. Impactos das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1057-1064, nov. 2004.

BARBOSA, J. N.; VOLTOLINI, G. B.; SOUZA, K. R. D. de; SANTOS, M. O. dos. Relação entre déficit hídrico e produtividade do cafeeiro arábica em diferentes altitudes. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 4, p. 489-497, 2016.

BENCKE, C. S. C.; MORELLATO, L. P. C.. Comparação de dois métodos de avaliação da fenologia de plantas, sua interpretação e representação. **Brazilian Journal of Botany**, v. 25, n. 3, p. 269–275, set. 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-84042002000300003>. Acesso em: 18 jun. 2025.

CAMARGO, Â. P. D.; CAMARGO, M. B. P. D.. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, v. 60, n. 1, p. 65-68, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052001000100008>. Acesso em: 18 jun. 2025.

CAPORAL, F. R.; COSTABEBER, J. A. **Agroecologia: enfoques científicos e estratégicos**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004.

CARVALHO, C. H. S. de (org.). **Cultivares de café: origem, características e recomendações**. Brasília, DF: Embrapa Café, 2008. 334 p.

CARVALHO, G. R.; REIS, T. H. M.; GOMES, A. P. de M.; REIS, A. M. dos; BOTELHO, C. E. Tolerância de cultivares de café arábica à seca. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 31, n. 257, p. 24-33, 2010.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Café: primeiro levantamento, janeiro 2024**. Brasília: Conab, 2024. (Fonte para dados de produção e economia no Brasil).

CUNHA, F. F.; CHITARRA, S. M. G.; REIS, A. C. dos; LEITE, S. A. de F.; SOUZA, J. A. de. Conservação da água e cobertura vegetal no manejo de cafezais em regiões de sequeiro. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 16, n. 3, p. 676–688, 2022. DOI: <https://doi.org/10.7127/rbai.v16n3001481>.

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**, Washington, v. 66, n. 21, p. 5264-5274, 2018. DOI: [10.1021/acs.jafc.7b04537](https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b04537).

DAMATTA, F. M.; MARTINS, S. C. V.; RAMALHO, J. D. C. Ecophysiology of coffee growth and production in a context of climate changes. In: DAMATTA, F. M.; RAMALHO, J. C. (Ed.). *Coffee: A Glimpse into the Future*. London: Academic Press/Elsevier, 2025. p. 97-139. **Advances in Botanical Research**, v. 114. DOI: 10.1016/bs.abr.2024.07.004.

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, n. 1, p. 167-178, 2019. DOI: 10.1007/s10584-018-2346-4.

DAMATTA, F. M.; RAMALHO, J. D. 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.

DAMATTA, F. M.; RENA, A. B.; CARVALHO, C. H. S. de. Aspectos fisiológicos do crescimento e da produção do cafeeiro. In: CARVALHO, C. H. S. (org.). **Cultivares de Café**. Varginha, MG: EMBRAPA, 2008. p. 49-56. Disponível em: http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/publicacoes_tecnicas/Livro_Cultivares.pdf. Acesso em: 18 jun. 2025.

DAMATTA, F. M.; RONCHI, C. P.; MAESTRI, M.; BARROS, R. S. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 19, n. 4, p. 485–510, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400014>.

DUBBERSTEIN, D.; PARTELLI, F. L.; MARQUARDT, L. S.; RAMALHO, J. C. Ecophysiological responses of *Coffea canephora* clones to deficit irrigation. **Genetics and Molecular Research**, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 1-13, 2017.

FERRÃO, R. G.; FONSECA, A. F. A. da; FERRÃO, M. A. G.; DE MUNER, L. H. (Ed.). **Conilon Coffee**. 3. ed. atual. e ampl. Vitória: Incaper, 2019. 974 p. ISBN 978-85-89274-32-6.

FERREIRA, W. P. M.; SOUZA, C. F. de; OLIVEIRA, A. D. de; RIBEIRO, M. de F.; VOLTOLINI, G. B. Estratégias para mitigação dos impactos do déficit hídrico na cafeicultura. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 40, n. 307, p. 57-66, 2019.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecology**: the ecology of sustainable food systems. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.

GONTIJO, G. L.; REIS, E. F. dos; SANTOS, A. R. dos; ROCHA, F. S. da; ALVES, T. L. Uso de geotecnologias na cafeicultura: identificação de áreas de estresse e apoio à gestão hídrica. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 12, n. 1, p. 29-42, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18406/2316-1817v12n120201389>.

GONTIJO, T. S.; OLIVEIRA, S. F. de; ALCÂNTARA, E. H. de; GOMES, L. N. Sensoriamento remoto aplicado à identificação de estresse hídrico em cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, Tupã, v. 14, n. 4, p. 385-398, 2020.

LAVIOLA, B. G.; GOMES, A. P. de M.; BOTELHO, C. E.; CARVALHO, G. R.; RESENDE, J. C. de. Compreendendo o ciclo fenológico do cafeeiro para aprimorar o manejo da cultura. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 41, n. 308, p. 44-52, 2020.

LEMES, E. M.; SOUZA, K. R. D. de; CARVALHO, G. R.; BARBOSA, J. N. Maturação de frutos de cafeeiro sob diferentes regimes hídricos. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 3, p. 308-316, jul./set. 2015.

MACHADO, L. C. P.; MACHADO FILHO, L. C. P. **Agroecologia 2.0: princípios e reflexões conceituais**. 2. ed. Viçosa, MG: Editora dos Autores, 2014.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; SOARES, A. A. **Manual de Irrigação**. 9. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2021. 545 p.

MARTINS, L. D.; SILVA, T. M. da; SOUZA, F. A. de; SANTOS, R. C. dos. Clima e cafeicultura: impactos, adaptação e vulnerabilidade. In: SOUZA, A. P. (org.). **Agrometeorologia aplicada à produção agrícola**. Jaboticabal: Maria de Lourdes Brandel, 2015. p. 125-148.

MARTINS, M. Q.; OLIVEIRA, S. F. de; ALCÂNTARA, E. H. de; GOMES, L. N. Cultivares de café arábica para ambientes com restrição hídrica. **Café Arábica – Manejo e Sustentabilidade**, [S. l.], v. 1, p. 33-46, 2015.

MARTINS, M. Q.; RIBEIRO, M. de F.; SOUZA, K. R. D. de; SANTOS, M. O. dos; CARVALHO, G. R. High-quality coffee production is not compromised by moderate deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 221, n. 1, p. 544-553, 2019.

MARTINS, M. Q.; DAMATTA, F. M.; SILVA, T. M. da; REIS, A. M. dos; BOTELHO, C. E. Physiological impacts of drought and recovery on the antioxidative system of *Coffea* species. **Plant Physiology and Biochemistry**, [S. l.], v. 86, p. 1-10, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.10.002>.

MEIRELES, E. J. L.; ALVES, H. M. R.; FERREIRA, W. P. M.; REIS, C. O. **Fenologia do cafeeiro: condições agrometeorológicas e balanço hídrico do ano agrícola 2004–2005**. Brasília: Embrapa Café, 2009. 128 p. (Documentos, n. 5). Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br:80/handle/123456789/3381>. Acesso em: 18 jun. 2025.

MENON, M. M.; SÁ, W. G. de; VIEIRA, R. C.; SOUZA, M. N. Barraginhas e cochinhos em curva de nível: estratégias de conservação do solo e da água em Atílio Vivácqua–ES. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em gestão ambiental. Vol. IV**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. p. 196-242. ISBN: 978-65-84548-36-7. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-36-7>.

MOGOR, A. F.; CHITARRA, S. M. G.; REIS, A. C. dos; LEITE, S. A. de F. Sistemas agroflorestais como alternativa para a cafeicultura familiar em áreas de relevo acidentado. **Cadernos de Agroecologia**, [S. l.], v. 15, n. 1, 2020.

MORAIS, H.; CARAMORI, P. H.; RIBEIRO, A. M. de A.; GOMES, J. C.; KOGUISHI, M. S. Escala fenológica detalhada da fase reprodutiva de *Coffea*

arabica. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, p. 257-260, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052008000100031>. Acesso em: 21 jun. 2025.

NASCIMENTO, A. R.; VOLTOLINI, G. B.; SOUZA, K. R. D. de; SANTOS, M. O. dos. Qualidade de grãos de café em função do déficit hídrico e do tipo de solo. **Coffee Science**, Lavras, v. 16, p. e161879, 2021. DOI: <https://doi.org/10.25186/cs.v16i.1879>.

NASCIMENTO, M. F.; SILVA, V. A.; SOUZA, K. R. D. de; CARVALHO, G. R.; BOTELHO, C. E. Alterações fisiológicas e produtividade do cafeeiro arábica submetido a diferentes regimes hídricos. **Coffee Science**, Lavras, v. 16, p. e161834, 2021.

NORA, R. D.; CHITARRA, S. M. G.; REIS, A. C. dos; LEITE, S. A. de F. Tecnologias sociais de convivência com o semiárido: experiências em agroecologia. **Revista Extensão Rural**, Santa Maria, n. 22, p. 113-130, 2015.

NUNES, L. S.; SILVA, V. A.; SOUZA, K. R. D. de; CARVALHO, G. R.; BOTELHO, C. E. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e produtividade de café sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 45, e0200156, 2021.

NUNES, M. A.; ROCHA, F. S. da; ALVES, T. L.; SOUZA, F. A. de; SANTOS, R. C. dos. Resposta fisiológica de cultivares de café arábica ao déficit hídrico em diferentes altitudes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 56, e02603, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.02603>.

PIZOL, J. V. Fenologia – Estádios Fenológicos. **Nutrição de Safras**. 1 set. 2021. Disponível em: <https://nutricaodesafras.com.br/estadios-fenologicos-fenologia>. Acesso em: 18 jun. 2025.

RAMALHO, A. R.; SILVA, V. A.; SOUZA, K. R. D. de; CARVALHO, G. R.; BOTELHO, C. E. Estresse hídrico em cafeeiros arábica: mecanismos fisiológicos de tolerância e estratégias de manejo. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 3, p. 314-322, 2014.

RAMALHO, J. C.; DUBBERSTEIN, D.; PARTELLI, F. L.; MARQUARDT, L. S. Resposta do cafeeiro ao estresse hídrico: uma abordagem integrada dos mecanismos de tolerância. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 2, p. 272-288, 2014.

RENA, A. B.; MAESTRI, M. Ecofisiologia do cafeeiro. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 1986, Campinas. **Anais...** Campinas: EMBRAPA-CPAC, 1986. p. 125-138.

ROCHA, A. C.; SILVA, V. A.; SOUZA, K. R. D. de; CARVALHO, G. R.; BOTELHO, C. E. Qualidade de grãos de café arábica submetidos a diferentes regimes de irrigação e adubação. **Coffee Science**, Lavras, v. 13, n. 4, p. 456-466, 2018.

ROCHA, O. C. G.; VOLTOLINI, G. B.; SOUZA, M. R. de; SANTOS, T. L. dos. Deficiência hídrica e qualidade do café: efeitos na composição química dos grãos

e na bebida. **Journal of Agricultural Studies**, [S. l.], v. 6, n. 4, p. 89-101, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5296/jas.v6i4.13845>.

SALVADOR, L.; BARBOSA, E. de M.; ZACARIAS, A. J.; RODRIGUES, P. D.; BRUNELI, L. V.; BESTETI, P. I. de O.; BERMOND, K. Z.; ADÃO, J. E. A.; PAULA, F. B. de; SOUZA, M. N. Mudanças climáticas e a vulnerabilidade da cafeicultura no Espírito Santo: riscos, impactos e estratégias de adaptação. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em Cafeicultura Vol. V – Cafeicultura Agroecológica**. Canoas: Mérida Publishers, 2025, p. 27-51. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-35-0.c1>.

SILVA, J. M. V. O.; SOUZA, M. N. **Produção de café orgânico: práticas agroecológicas conservacionistas e novas tecnologias disponíveis ao produtor rural**. 1. ed. Meidrum Street, Mauritius: Novas Edições Acadêmicas, 2021. 72 p.

SILVA, S. A.; CHITARRA, S. M. G.; REIS, A. C. dos; LEITE, S. A. de F. Phenological stages of coffee plants under different irrigation regimes. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 49, n. 3, p. 456-464, 2018.

SILVA, S. A.; SOUZA, J. S. Manejo agroecológico do solo e seus impactos na disponibilidade hídrica para a cultura do café. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 16, n. 2, p. 142-150, 2021.

SOUSA, D. G. ; PEREIRA, L. L.; OLIVEIRA, E. C. S.; MOREIRA, T. R. de. **Métodos de processamento para o café conilon: novas perspectivas para a produção de café conilon de especialidade**. Vitória: Edifes Acadêmico, 2026. E-book (21 p.). ISBN 978-65-5331-161-9.

SOUSA, D. S. M. de; BRUNELI, L. V.; SANTOS, A. T. B. dos; MACHADO, L. C. A.; RODRIGUES, R. M.; OLIMPIO, S. de O.; COSTA, W. M. da; AMARAL, A. A. do; SILVA, E. P. da; LIMA, O. A.; SOUZA, M. N. Defesa vegetal em sistemas agroecológicos: fundamentos fisiológicos, microbiológicos e interações ecológicas. In: SOUZA, M. N. (org.). **Tópicos em Gestão Ambiental: v. 5**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026. p. 59-103. ISBN 978-65-84548-45-9. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-45-9.c2>

SOUZA, A. P.; SANTOS, M. O. dos; SOUZA, K. R. D. de; SILVA, T. M. da. Manejo conservacionista da água na cultura do café: alternativas para agricultura familiar. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 8, n. 4, p. 240-247, 2013.

SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em cafeicultura Vol. V - cafeicultura agroecológica I**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. 310 p. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-35-0>.

SOUZA, M. N. Agroecologia: fundamentos conceituais e princípios orientadores. In: SOUZA, M. N. **Agroecologia: a sustentabilidade verde - da agricultura convencional à transformação agroecológica**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026b. p. 21-32. ISBN: 978-65-84548-44-2. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-44-2.c1>.

SOUZA, M. N. Conversão da agricultura convencional para agroecológica. In: SOUZA, M. N. **Agroecologia: a sustentabilidade verde - da agricultura convencional à transformação agroecológica**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026e. p. 123-130. **ISBN: 978-65-84548-44-2**. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-44-2.c7>.

SOUZA, M. N.; COSTA, W. M. da; AMARAL, A. A. do; GUMIERE, T. S.; MACHADO, L. C. A.; XAVIER, S. A. B.; GUIA, I. B. da; SANTOS, A. T. B. dos; ALMEIDA, D. S. de. Gestão ambiental e as dimensões da sustentabilidade agroecológica. In: SOUZA, M. N. (org.). **Tópicos em Gestão Ambiental: v. 5**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026. p. 36-58. ISBN 978-65-84548-45-9. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-45-9.c1>

SOUZA, M. N.; MANTOVANI, E. C.; ORELLANA GONZÁLEZ, A. M. G.; SANCHEZ ROMAN, R. M.; SILVA, M. A. A. Software STELLA and the hydrologic behavior in the basin of the Entre Ribeiro river, Paracatu river tributary, in scenery of climatic change. **Cadernos UNICAMP**, v.84, p.67-79, 2012.

CAPÍTULO 3

Biocarvão em sistemas cafeeiros: efeitos nos atributos do solo e na sustentabilidade produtiva

Dâmaris de Souza Guimarães, Alex Justino Zacarias, Déborah Sampaio de Almeida, Magno do Carmo Parajara, Otacílio José Passos Rangel, Fernanda Barcelos de Paula, Willian Moreira da Costa, Atanásio Alves do Amaral, Maurício Novaes Souza

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-46-6.c3>

Resumo

O solo desempenha papel fundamental na sustentabilidade da produção cafeeira, influenciando diretamente a disponibilidade de água e nutrientes, o desenvolvimento radicular e a produtividade das plantas. Em regiões tropicais, a predominância de solos altamente intemperizados, caracterizados por elevada acidez, baixa fertilidade natural e reduzida capacidade tampão, constitui um dos principais desafios para a cafeicultura. Nesse contexto, o biocarvão tem se destacado como uma alternativa promissora para a melhoria da qualidade do solo e para o fortalecimento da sustentabilidade dos sistemas produtivos. Este capítulo discute os principais mecanismos de atuação do biocarvão, abordando seus efeitos sobre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, com ênfase na elevação do pH, no aumento da capacidade de troca catiônica, na retenção de água e no estímulo à atividade microbiana. Também são discutidos aspectos relacionados à produção do biocarvão a partir de resíduos da própria cafeicultura, especialmente cascas, palhas e resíduos de poda, destacando seu potencial para promover a economia circular e agregar valor a subprodutos agrícolas. Além dos benefícios agronômicos, o biocarvão contribui para o sequestro de carbono e para a mitigação das mudanças climáticas, configurando-se como uma ferramenta estratégica para a agricultura de baixo carbono. Conclui-se que sua eficiência depende da qualidade da biomassa, das condições de pirólise e da adoção de práticas adequadas de manejo, sendo seu uso particularmente relevante para a construção de sistemas cafeeiros mais resilientes e sustentáveis.

Palavras-chave: Pirólise. Economia circular. Resíduos agroindustriais. Agricultura regenerativa. Capacidade de troca catiônica. Resiliência climática.

1. Introdução

O biocarvão tem despertado crescente interesse na comunidade científica e no setor produtivo, em função de seu elevado potencial para contribuir com a gestão sustentável de resíduos, a recuperação de áreas degradadas, a geração de energia renovável, o sequestro de carbono e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, destaca-se como condicionador de solos e agente remediador em ambientes contaminados, incluindo corpos hídricos (Lehmann; Joseph, 2015; Zacarias *et al.*, 2022).

Nesse contexto, o reaproveitamento de resíduos orgânicos por meio da produção de biocarvão vem sendo resgatado e amplamente investigado como alternativa viável para a melhoria da qualidade do solo e do equilíbrio ambiental (Figura 1). Ressalta-se que o biocarvão apresenta composição química e estrutural altamente variável, influenciada tanto pela natureza da matéria-prima quanto pelas condições do processo de pirólise (IBI, 2015).

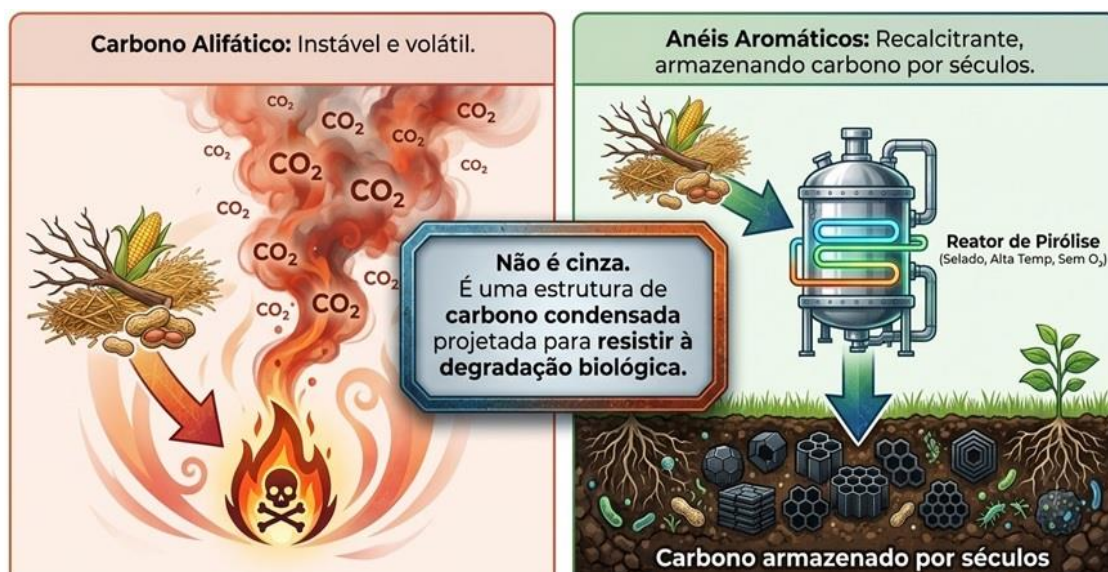


Figura 1. Fluxo de produção do biocarvão e seu papel no equilíbrio ambiental. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Em sistemas agrícolas, a aplicação de biocarvão tem sido associada a diversos efeitos benéficos sobre o solo, incluindo a elevação do pH, o aumento da capacidade de troca de cátions, a maior disponibilidade de nutrientes e alterações positivas na microbiota edáfica. Adicionalmente, contribui para a melhoria da estrutura do solo, promovendo maior agregação, redução da

densidade aparente e incremento na retenção de água (Lehmann, 2009). Além dos benefícios agronômicos, o biocarvão apresenta elevada estabilidade química, característica que lhe confere importante papel no sequestro de carbono e na mitigação das mudanças climáticas. Essa dupla função, agrícola e ambiental, tem ampliado o interesse de pesquisadores em diferentes áreas do conhecimento e em diversos países (Figura 2).

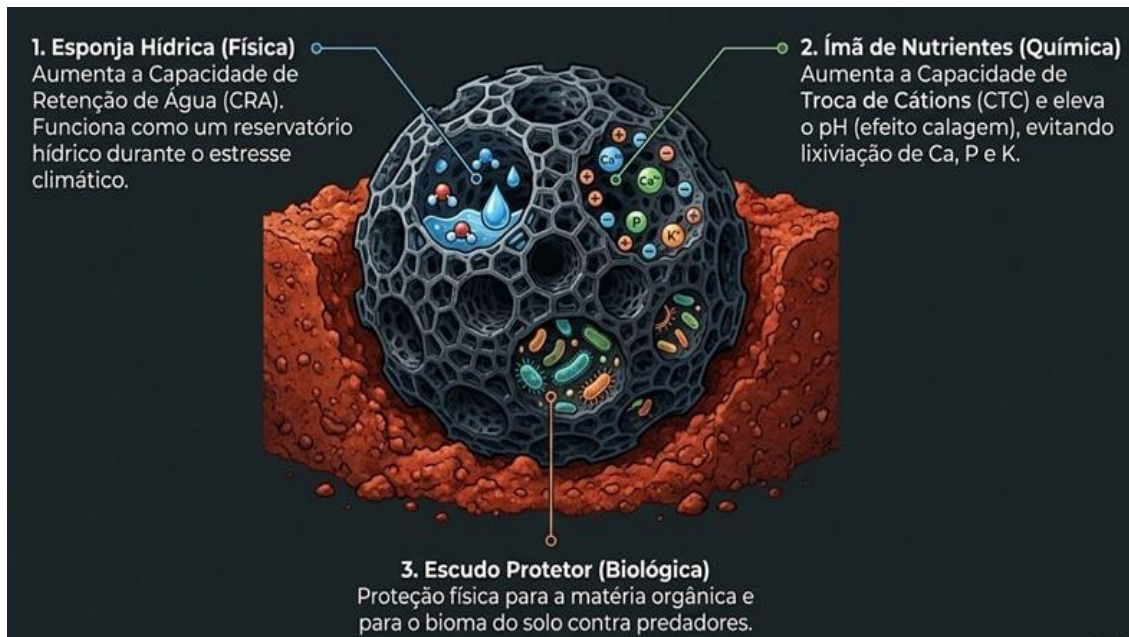


Figura 2. Interações do biocarvão e seus efeitos nas propriedades físico-químicas e biológicas do solo. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Os mecanismos responsáveis por esses benefícios estão diretamente relacionados às características físico-químicas e biológicas do biocarvão, especialmente à sua elevada porosidade, área superficial específica e persistência no ambiente edáfico. No contexto da cafeicultura, o uso do biocarvão vem sendo explorado como uma estratégia promissora para o manejo sustentável do solo, com potencial para melhorar atributos físicos, químicos e biológicos essenciais ao desenvolvimento do cafeeiro. Sua aplicação pode favorecer o crescimento das plantas por meio da correção da acidez do solo, aumento do teor de matéria orgânica, maior disponibilidade de nutrientes e estímulo à atividade microbiana (Jien; Wang, 2013).

Tais benefícios são particularmente relevantes em regiões caracterizadas por solos ácidos e de baixa fertilidade natural, condições frequentemente observadas em áreas produtoras de café no Brasil. Dessa forma, o biocarvão se apresenta como uma alternativa inovadora para a promoção da sustentabilidade na cafeicultura, contribuindo simultaneamente para o aumento da produtividade, a melhoria da qualidade dos grãos e a redução dos impactos e externalidades ambientais associados à atividade (Moura *et al.*, 2022) (Figura 3).

	Eucalipto (Tese SP)	Casca de Café (Agritech)	Poda de Mangueira/Uva (Semiárido)	Mata Nativa (Semiárido)
Temperatura Base	~350°C	500-700°C	Não especificada	Não especificada
Solo Testado	Latossolo Argiloso	Diversos	Argissolo Amarelo	Argissolo Amarelo
Impacto Químico (pH e P)	Alto positivo	Alto positivo	Alto positivo	Baixo/Negativo

Alert: A qualidade do biocarvão depende estritamente de sua matéria-prima. Estudos em Petrolina (PE) provam que o biocarvão de mata nativa apresentou a pior performance química, desqualificando o desmatamento para sua produção.

Figura 3. Caracterização comparativa de biocarvões em função da natureza da biomassa residual. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A diversidade de matérias-primas disponíveis para a produção de biocarvão resulta em materiais com propriedades físico-químicas distintas, o que amplia suas possibilidades de aplicação em diferentes condições edafoclimáticas e sistemas produtivos. Compreender essas características torna-se fundamental para a utilização eficiente desse insumo na agricultura (Enders *et al.*, 2012; Mukherjee; Lal, 2013; Lehmann; Joseph, 2015).

Diante desse cenário, o presente capítulo tem como objetivo analisar os impactos do uso do biocarvão na qualidade do solo em sistemas cafeeiros, com ênfase em seus efeitos sobre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, bem como discutir seu potencial como estratégia sustentável para a melhoria da produtividade e a mitigação de impactos ambientais na cafeicultura. Para

compreender esses efeitos, torna-se necessário inicialmente discutir as características estruturais do biocarvão, os processos envolvidos em sua produção e suas principais aplicações no contexto agrícola.

Além dos benefícios agrônômicos e ambientais, a utilização do biocarvão na cafeicultura apresenta uma vantagem estratégica relacionada à disponibilidade de biomassa residual. Resíduos provenientes do processamento e manejo da cultura, como cascas, pergaminho, palha e materiais oriundos da poda, podem ser convertidos em biocarvão por meio da pirólise, promovendo o reaproveitamento de subprodutos e fortalecendo os princípios da economia circular nos sistemas produtivos cafeeiros (Woolf *et al.*, 2010; Mussatto *et al.*, 2011; Alvarenga *et al.*, 2023).

2. Características e aplicações do biocarvão na agricultura

O biocarvão é um material sólido rico em carbono, obtido pela conversão termoquímica de biomassa em condições de baixa ou ausência de oxigênio, denominada pirólise. O interesse científico por sua aplicação na agricultura foi intensificado a partir dos estudos sobre a Terra Preta de Índio (TPI), solos antropogênicos encontrados na Amazônia brasileira, caracterizados por coloração escura, elevada fertilidade e notável estabilidade da matéria orgânica. Esses solos apresentam altos teores de carbono pirogênico, fósforo, cálcio e outros nutrientes, além de elevada atividade biológica, características que despertaram o interesse de pesquisadores na reprodução artificial desses atributos por meio da aplicação de biocarvão em sistemas agrícolas (Falcão *et al.*, 2009).

Esses solos apresentam elevada capacidade de retenção de nutrientes e carbono, sendo frequentemente utilizados como referência para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis de manejo e recuperação da fertilidade do solo. Embora diferentes hipóteses tenham sido propostas para explicar sua formação, destaca-se a influência de atividades antrópicas associadas ao acúmulo contínuo de resíduos orgânicos, restos alimentares, materiais cerâmicos e carvão pirogênico ao longo de centenas ou milhares de anos. Adicionalmente, processos naturais, como a deposição aluvial de

sedimentos ricos em carbono e nutrientes, podem ter contribuído para a constituição dessas áreas de elevada fertilidade (Silva *et al.*, 2021).

No contexto agrícola, a principal forma de utilização do biocarvão consiste em sua incorporação ao solo, visando melhorar atributos físicos, químicos e biológicos. Entretanto, suas possibilidades de uso extrapolam essa finalidade, podendo integrar formulações de fertilizantes, substratos agrícolas e materiais adsorventes. O biocarvão também tem sido empregado na remediação de ambientes contaminados, em razão de sua elevada capacidade de adsorção de compostos potencialmente tóxicos, além de contribuir para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e para a implantação de estratégias de agricultura de baixo carbono (IBI, 2015). Essas múltiplas funções evidenciam seu potencial como insumo versátil e estratégico para a construção de sistemas agrícolas mais sustentáveis, conforme ilustrado na Figura 4.



Figura 4. Distribuição de biocarvão em sulcos de plantio em sistema agrícola no Distrito de Rive, município de Alegre, ES. Fonte: Zacarias, 2019.

Diversos fatores podem influenciar positiva ou negativamente a viabilidade e a eficiência do uso do biocarvão na agricultura, abrangendo aspectos econômicos, logísticos, técnicos e ambientais. Entre os principais fatores

destacam-se a disponibilidade de biomassa, a distância entre as áreas produtoras e os reatores pirolíticos, a caracterização química da matéria-prima e a logística relacionada à produção, ao transporte e à aplicação do material.

Além disso, a definição adequada da dose, da época e da forma de aplicação, bem como as interações com corretivos, fertilizantes e defensivos agrícolas, podem influenciar significativamente os resultados obtidos no campo. Também devem ser considerados potenciais efeitos sobre a fauna edáfica, riscos ocupacionais durante o manuseio e o atendimento às exigências legais e ambientais vigentes (Andrade *et al.*, 2023).

Apesar dessas limitações, o crescente avanço das pesquisas tem demonstrado que a eficiência agrônômica do biocarvão está diretamente relacionada às suas propriedades físico-químicas, as quais são determinadas principalmente pela natureza da biomassa utilizada e pelas condições do processo de pirólise.

Nesse contexto, a Iniciativa Internacional de Biocarvão (IBI) publicou, em 2015, um conjunto de diretrizes para a amostragem, caracterização e análise das propriedades químicas, físicas e biológicas do biocarvão, contribuindo para a padronização metodológica, a comparação entre estudos e a segurança de sua utilização em sistemas agrícolas e ambientais (IBI, 2015).

No setor agropecuário, o potencial de sequestro de carbono no solo confere ao biocarvão um caráter estratégico, capaz de agregar valor à produção agrícola e favorecer o acesso a mercados associados à sustentabilidade e à agricultura de baixo carbono. A pirólise, processo de decomposição termoquímica da biomassa na ausência total ou parcial de oxigênio, é geralmente conduzida em temperaturas entre 300 e 700 °C, sendo considerada uma tecnologia eficiente para o aproveitamento de resíduos orgânicos. Esse processo promove a redução significativa do volume da biomassa, a eliminação de patógenos e a geração de produtos com potencial energético e químico de elevado valor agregam (Conesa *et al.*, 2009; Ahmad *et al.*, 2014; Tan *et al.*, 2014).

A eficiência da pirólise não está associada apenas à produção do biocarvão, mas também ao aproveitamento integral da biomassa residual. Dependendo das condições operacionais, o processo gera simultaneamente bio-

óleo, gases combustíveis e biocarvão, produtos que podem ser utilizados para fins energéticos, industriais e agrícolas. Dessa forma, a pirólise representa uma tecnologia alinhada aos princípios da economia circular, promovendo o reaproveitamento de resíduos orgânicos e a redução da dependência de recursos não renováveis (Lehmann; Joseph, 2015). A dinâmica desse processo é apresentada na Figura 5.

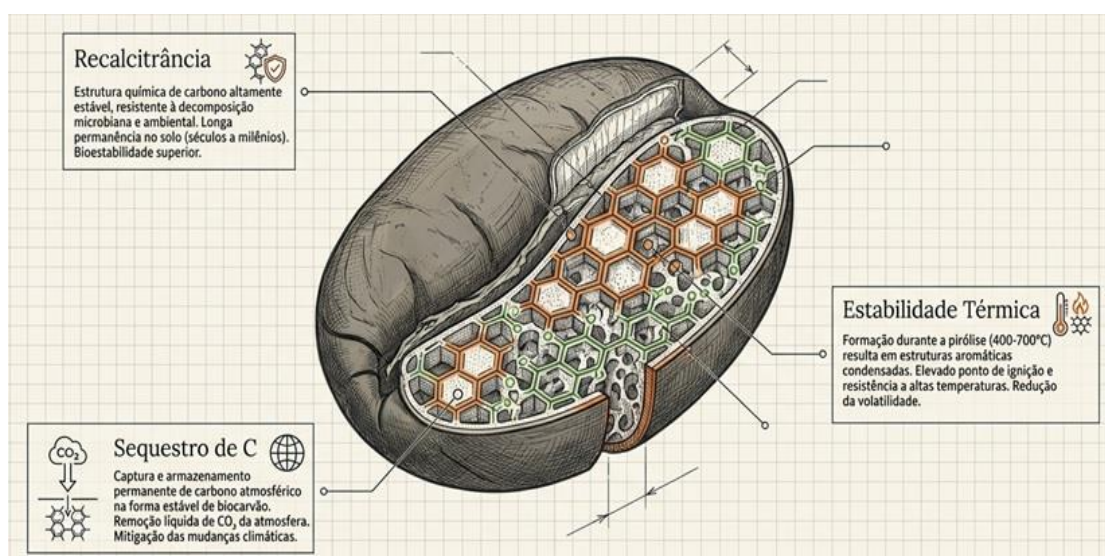


Figura 5. Representação esquemática do processo de pirólise e de suas contribuições para a bioeconomia circular, incluindo a produção de biocarvão, bio-óleo e gases combustíveis. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

As propriedades do biocarvão, como capacidade de troca de cátions (CTC), pH, área superficial específica e teor de carbono, estão diretamente relacionadas à natureza da biomassa utilizada, ao tamanho das partículas e às condições do processo de produção (Paz-Ferreiro *et al.*, 2014). No entanto, tais características podem sofrer modificações após sua incorporação ao solo em decorrência do processo de envelhecimento (*aging*), que compreende um conjunto de transformações físicas, químicas e biológicas resultantes da interação contínua do material com a matriz edáfica. Esse processo pode promover alterações na superfície do biocarvão, aumentar a formação de grupos funcionais oxigenados e modificar sua capacidade de retenção de nutrientes e água, influenciando diretamente sua eficiência agrônômica ao longo do tempo (Kookana, 2010).

Estudos experimentais evidenciam os efeitos positivos do biocarvão sobre atributos do solo. Major *et al.* (2010) observaram que o uso de biocarvão produzido a partir de resíduos de madeira promoveu elevação do pH, aumento dos teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e redução da acidez trocável. Resultados semelhantes foram reportados por Liang *et al.* (2006), que identificaram redução da densidade do solo, aumento do pH e maior capacidade de retenção de água (Figura 6). Adicionalmente, alterações na estrutura do solo, como aumento da microporosidade e redução da macroporosidade, foram descritas por Torres, Amorim e Faria (2024).

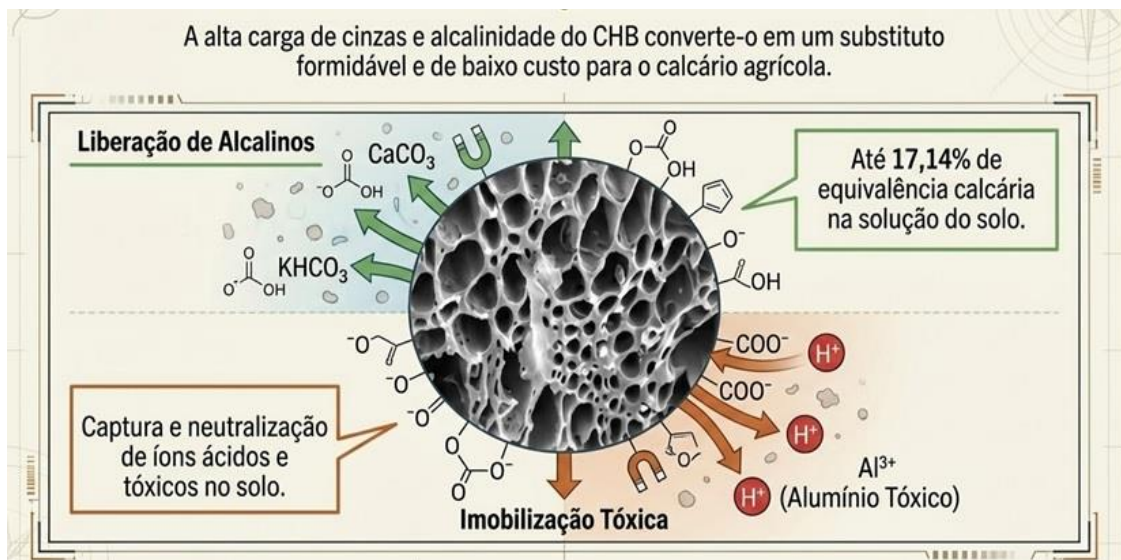


Figura 6. Representação dos processos de condicionamento químico e físico do solo por biocarvão. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

No que se refere à produtividade agrícola, Zhao *et al.* (2014) verificaram incremento na produção de arroz e trigo, associado à maior disponibilidade de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) no solo. Lima *et al.* (2024) relataram que o biocarvão produzido a partir de cama de frango e fibra de coco reduziu a adsorção de fósforo, aumentando sua disponibilidade para as plantas.

De forma semelhante, Albuquerque *et al.* (2013) observaram que diferentes tipos de biocarvão atuaram como fonte de fósforo após período de incubação em casa de vegetação. Em estudos de longo prazo, Carneiro *et al.* (2020) também registraram aumento na disponibilidade de fósforo em solos

tropicais sob sistema integrado de rotação de culturas (capim, milho e feijão). Além de favorecer a fertilidade do solo, a aplicação de biocarvão contribui para a redução das emissões de CO₂, reforçando seu potencial na mitigação das mudanças climáticas (Woolf *et al.*, 2010; Lehmann *et al.*, 2011).

Durante a pirólise, parte do carbono presente na biomassa é convertida em formas altamente estáveis, capazes de permanecer armazenadas no solo por décadas ou séculos, reduzindo o retorno de CO₂ à atmosfera (Woolf *et al.*, 2010; Lehmann *et al.*, 2011; Lehmann; Joseph, 2015). Assim, o biocarvão constitui uma importante estratégia de sequestro de carbono e de aproveitamento de resíduos agrícolas, integrando práticas de manejo sustentável do solo, economia circular e agricultura de baixo carbono (*ibidem*) (Figura 7).



Figura 7. Aumento da disponibilidade de nutrientes e redução das emissões de CO₂ em sistemas agrícolas com biocarvão. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A dinâmica de estabilização do carbono promovida pelo biocarvão reforça sua importância não apenas como condicionador de solo, mas também como ferramenta estratégica para sistemas produtivos mais resilientes e ambientalmente sustentáveis. No contexto da cafeicultura, esses benefícios podem ser potencializados pela grande disponibilidade de biomassa residual gerada ao longo da cadeia produtiva, favorecendo o fechamento dos ciclos biogeoquímicos, a reciclagem de nutrientes e a redução da pegada de carbono da atividade. Nesse cenário, compreender a importância do solo para o

desenvolvimento do cafeeiro torna-se fundamental para avaliar o potencial do biocarvão como tecnologia voltada à melhoria da qualidade edáfica e da sustentabilidade produtiva.

3. Importância do solo para a produção cafeeira

A cafeicultura constitui uma atividade agrícola de elevada relevância econômica e social, especialmente em países tropicais como o Brasil. Nesse contexto, a produtividade e a qualidade do café estão diretamente condicionadas às características do solo, o qual deve apresentar atributos físicos, químicos e biológicos adequados ao pleno desenvolvimento do cafeeiro. Entre esses atributos, destacam-se a fertilidade, a estrutura do solo e a disponibilidade hídrica, elementos essenciais para o crescimento radicular, a absorção de nutrientes e o desempenho fisiológico das plantas (Malavolta *et al.*, 1997; Prado *et al.*, 2021).

Entretanto, a exploração contínua do solo em sistemas de manejo convencional pode desencadear processos de degradação, como a redução dos teores de matéria orgânica, a compactação, a acidificação e o desequilíbrio da microbiota edáfica. Tais alterações comprometem a capacidade produtiva do solo e reduzem sua sustentabilidade em longo prazo. Diante desse cenário, torna-se fundamental a adoção de práticas conservacionistas e o uso de insumos que promovam a saúde do solo, favorecendo a construção de sistemas produtivos mais resilientes (Silva; Mendonça, 2007; Macedo; Seabra; Silva, 2008; Souza, 2026).

A qualidade do solo pode ser compreendida como a capacidade desse recurso em sustentar a produtividade vegetal, manter a qualidade ambiental e promover a saúde dos organismos que nele habitam. Na cafeicultura, essa condição depende da interação equilibrada entre atributos físicos, químicos e biológicos, os quais influenciam diretamente processos como infiltração e armazenamento de água, ciclagem de nutrientes, desenvolvimento radicular e atividade microbiana (Figura 8). Solos com boa estrutura e elevados teores de matéria orgânica tendem a apresentar maior estabilidade física e química, favorecendo o crescimento das plantas e aumentando a resiliência dos sistemas

produtivos frente às oscilações climáticas (Vezzani; Mielniczuk, 2009; Brady; Weil, 2013; Souza, 2026).

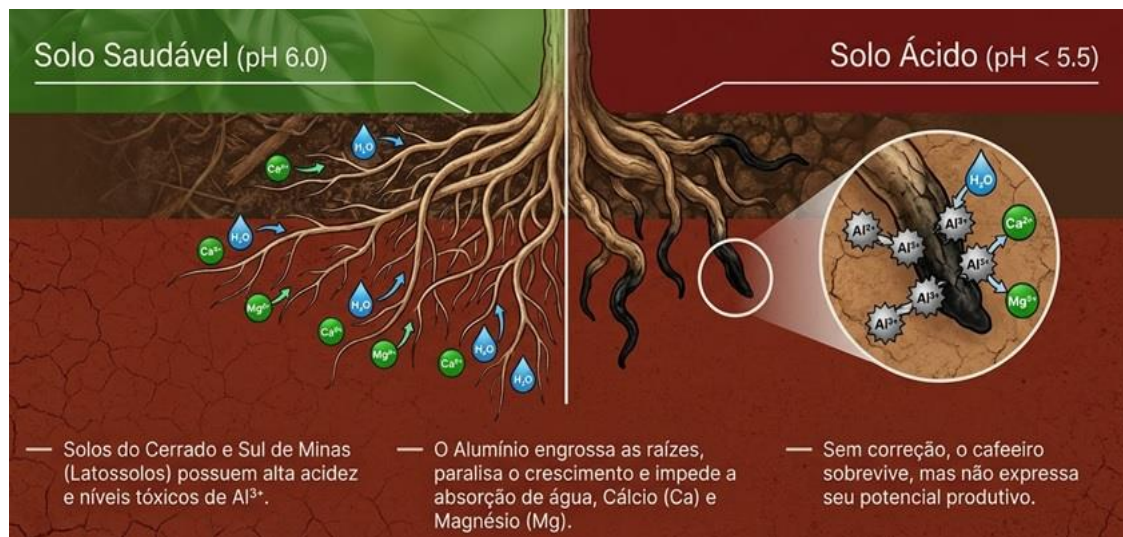


Figura 8. Fatores limitantes à produtividade: compactação, acidificação e perda de matéria orgânica. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Os atributos do solo exercem influência direta sobre o desempenho agrônômico do cafeeiro ao longo de todo o ciclo produtivo. Alterações na estrutura física podem restringir o crescimento radicular, reduzir a infiltração e o armazenamento de água e comprometer a absorção de nutrientes. Da mesma forma, limitações químicas afetam a disponibilidade de elementos essenciais ao desenvolvimento vegetativo e à formação dos frutos. Paralelamente, a redução da atividade biológica compromete processos fundamentais relacionados à decomposição da matéria orgânica, à ciclagem de nutrientes e à manutenção da fertilidade do solo. Dessa forma, a degradação edáfica representa um dos principais fatores limitantes à produtividade, à sustentabilidade e à longevidade das lavouras cafeeiras (Vezzani; Mielniczuk, 2009; Brady; Weil, 2013; Souza, 2026).

Entre as limitações mais expressivas à produção cafeeira no Brasil, destaca-se a acidez do solo, particularmente em regiões de clima tropical úmido, onde a elevada pluviosidade intensifica a lixiviação de cátions básicos. Como consequência, observa-se baixa saturação por bases, presença de alumínio em níveis tóxicos e reduzida disponibilidade de fósforo, fatores que demandam

intervenções recorrentes, como a calagem e a adubação fosfatada, elevando os custos de produção (Raij, 2011).

A acidez do solo pode ser compreendida sob diferentes formas: a acidez ativa (H^+), relacionada à solução do solo; a acidez trocável (Al^{3+}), associada aos coloides; e a acidez potencial ($H+Al$), que expressa a capacidade tampão do sistema. Essa distinção é fundamental para o manejo adequado da fertilidade, uma vez que solos com elevada acidez potencial demandam maiores quantidades de corretivos para promover alterações significativas no pH. Solos com maior teor de argila e matéria orgânica tendem a apresentar maior capacidade tampão, o que implica maior resistência às mudanças de pH e, consequentemente, maior necessidade de insumos corretivos.

Para o cafeeiro, a faixa de pH considerada ideal situa-se entre 6,0 e 6,5, condição na qual ocorre a redução da toxicidade por alumínio e a maximização da disponibilidade de nutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal. Adicionalmente, o equilíbrio entre cálcio (Ca) e magnésio (Mg) no complexo de troca do solo exerce papel relevante no desempenho fisiológico das plantas, sendo recomendada uma relação Ca:Mg entre 3:1 e 4:1. Desequilíbrios nessa relação podem provocar inibição competitiva na absorção desses nutrientes, comprometendo processos fundamentais, como a formação de estruturas celulares e a atividade fotossintética (Matiello *et al.*, 2020; Guimarães *et al.*, 2022).

A manutenção de condições químicas favoráveis ao desenvolvimento do cafeeiro depende não apenas da correção da acidez, mas também da capacidade do solo em armazenar e disponibilizar nutrientes ao longo do tempo. Nesse contexto, atributos como capacidade de troca catiônica, saturação por bases e teor de matéria orgânica assumem papel fundamental na regulação da fertilidade. Alterações nesses parâmetros afetam diretamente a eficiência do uso de fertilizantes e o desempenho fisiológico das plantas, reforçando a importância de práticas de manejo que promovam a melhoria da qualidade química do solo, conforme ilustrado na Figura 9 (Raij, 2011; Malavolta *et al.*, 1997; Matiello *et al.*, 2020; Souza *et al.*, 2026).



Figura 9. Correção da acidez do solo e otimização da relação Ca:Mg como fatores determinantes da fertilidade em sistemas cafeeiros. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Outro desafio relevante refere-se à compactação do solo, que interfere negativamente no desenvolvimento do sistema radicular, na infiltração de água e na aeração, limitando a absorção de nutrientes pelas plantas. Esse problema é recorrente em áreas cafeeiras submetidas à mecanização intensiva ou ao tráfego frequente de máquinas e pessoas, demandando a adoção de práticas de manejo que promovam a descompactação e a melhoria da estrutura do solo (Reichert; Norton; Huang, 2007). Entretanto, a qualidade do solo não depende exclusivamente de seus atributos físicos e químicos. A funcionalidade dos processos biológicos também exerce papel determinante na manutenção da fertilidade e da estabilidade dos agroecossistemas cafeeiros.

Além dos atributos físicos e químicos, a manutenção de uma microbiota ativa e diversificada é essencial para a funcionalidade do solo. Os microrganismos desempenham papel central na ciclagem de nutrientes, na decomposição da matéria orgânica e na supressão de patógenos. A atividade microbiana está diretamente relacionada à disponibilidade de matéria orgânica e à estabilidade do ambiente edáfico, sendo considerado um importante indicador da qualidade do solo e da sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Silva; Mendonça, 2007; Lehmann *et al.*, 2011; Oliveira *et al.*, 2021) (Figura 10).

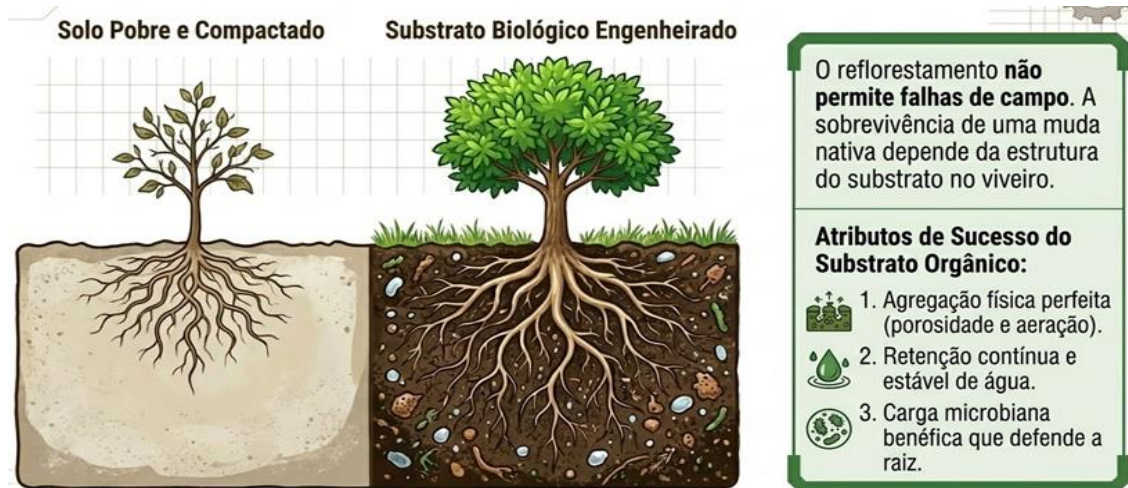


Figura 10. Representação da atividade microbiana e sua contribuição para a funcionalidade do solo. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A manutenção da atividade microbiana e dos processos biológicos do solo está diretamente relacionada à disponibilidade de matéria orgânica e à adoção de práticas conservacionistas de manejo. Nesse contexto, estratégias integradas voltadas ao incremento da matéria orgânica têm se destacado como ferramentas fundamentais para a melhoria da qualidade do solo e da sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Souza *et al.*, 2026).

O processo de compostagem, por exemplo, pode ser potencializado pela adição de biocarvão (biochar) como condicionador do sistema (Melo, 2019). Sua incorporação ao composto orgânico promove melhorias nas propriedades físicas, como o aumento da porosidade, a redução da densidade aparente e a maior aeração, favorecendo a disponibilidade de oxigênio (O_2) para os microrganismos decompositores (Ferreira *et al.*, 2017).

Além dos efeitos sobre o processo de compostagem, o biocarvão pode atuar diretamente na melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Sua elevada área superficial específica e sua estrutura altamente porosa favorecem a retenção de água, a adsorção de nutrientes e a criação de microambientes propícios ao desenvolvimento de microrganismos benéficos. Essas características explicam o crescente interesse pelo uso do biocarvão como condicionador de solo em sistemas agrícolas sustentáveis, incluindo a

cafeicultura (Lehmann *et al.*, 2011; Lehmann; Joseph, 2015; Souza; Simão, 2024).

Adicionalmente, a estrutura altamente porosa do biocarvão proporciona sítios favoráveis à colonização microbiana, intensificando a atividade biológica e acelerando o processo de decomposição da matéria orgânica. Esse efeito contribui para a formação de compostos mais estáveis e com maior capacidade de retenção de nutrientes. No contexto da cafeicultura, a utilização conjunta de resíduos orgânicos e biocarvão, especialmente a partir da pirólise da palha de café, configura-se como uma estratégia eficiente de reciclagem de nutrientes e fortalecimento da fertilidade do solo, alinhada aos princípios da economia circular (Figura 11).

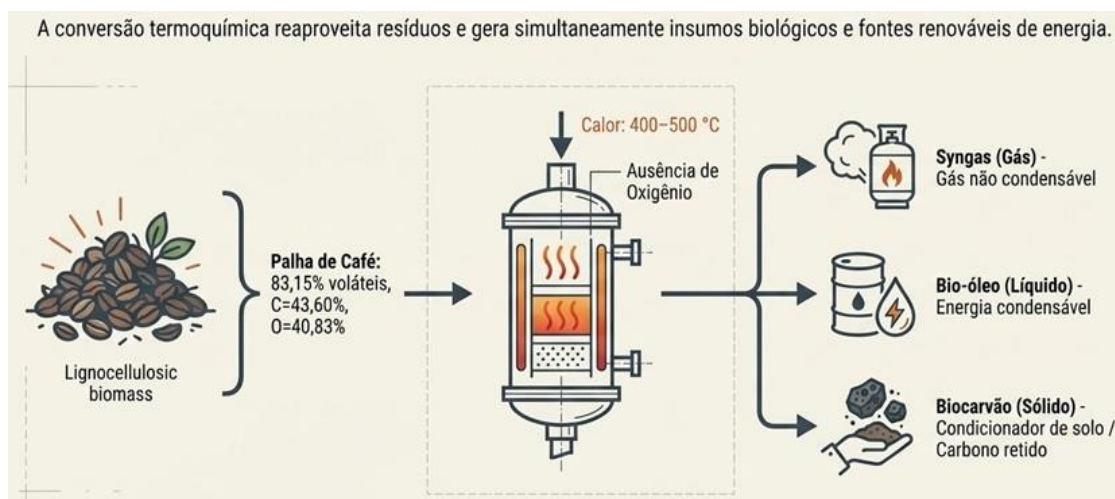


Figura 11. Esquema da economia circular na cafeicultura através da pirólise da palha de café. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Dessa forma, a melhoria das condições do solo na cafeicultura não deve se restringir ao uso de corretivos e fertilizantes minerais, mas incorporar abordagens integradas capazes de promover a resiliência, a eficiência no uso de recursos e o equilíbrio dos processos ecológicos do sistema produtivo. Nesse contexto, o biocarvão destaca-se como uma alternativa promissora por atuar simultaneamente sobre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e para a produtividade das

lavouras cafeeiras (Lehmann; Joseph, 2015). Esses mecanismos e seus efeitos nos sistemas cafeeiros são discutidos em maior detalhe na seção seguinte.

4. Efeitos do biocarvão sobre os atributos do solo em sistemas cafeeiros

O biocarvão tem se consolidado como um insumo agrícola promissor, com potencial para melhorar a qualidade do solo e ampliar a sustentabilidade dos sistemas de produção, incluindo a cafeicultura (Figura 12). Sua aplicação em solos cultivados com cafeeiro visa mitigar limitações edáficas e promover condições mais favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das plantas (Glaser; Lehmann; Zech, 2002; Lehmann; Joseph, 2015).



Figura 12. Integração do biocarvão no sistema produtivo para a melhoria da qualidade do solo. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Na prática, os benefícios associados ao biocarvão decorrem não apenas de suas características intrínsecas, mas também da forma como esse material é integrado ao manejo agrícola. Em sistemas cafeeiros, sua utilização pode ocorrer em diferentes etapas do ciclo produtivo, potencializando os processos de melhoria da qualidade do solo e da eficiência do uso de nutrientes. Na cafeicultura, o biocarvão pode ser utilizado em diferentes fases do sistema produtivo, desde a implantação do cafezal até o manejo de lavouras em produção. Sua aplicação pode ocorrer de forma incorporada ao solo, durante o

preparo das covas de plantio, ou em cobertura, frequentemente associada a compostos orgânicos, esterco ou adubos verdes (Figura 13). A definição da dose, da forma e do momento de aplicação depende de fatores como tipo de solo, condições climáticas e objetivos do manejo (Novotny *et al.*, 2015).



Figura 13. Formas de uso do biocarvão na cafeicultura, incluindo aplicação em covas de plantio, cobertura do solo e associação com insumos orgânicos. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (ChatGPT).

Estudos indicam que o uso do biocarvão pode contribuir para o aumento da produtividade do cafeeiro, sobretudo em função das melhorias promovidas nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Entre os efeitos mais recorrentes, destacam-se a elevação do pH, o aumento da capacidade de troca de cátions (CTC) e a maior retenção de nutrientes, especialmente em solos ácidos e de baixa fertilidade, comuns em regiões cafeeiras tropicais (Lehmann *et al.*, 2011; Paz-Ferreiro *et al.*, 2014). Essas modificações influenciam diretamente a disponibilidade de recursos para as plantas e justificam a análise detalhada dos impactos do biocarvão sobre os diferentes componentes da qualidade do solo.

O potencial corretivo do biocarvão pode ser estimado por meio do equivalente de carbonato de cálcio (CaCO_3 eq), que expressa sua capacidade relativa de neutralização da acidez. Embora, em geral, seja inferior à do calcário convencional, essa capacidade tende a apresentar maior persistência no solo, devido à atuação contínua dos grupos funcionais superficiais do biocarvão. Em solos tropicais altamente intemperizados, a baixa capacidade tampão intensifica a vulnerabilidade a variações de pH, de modo que o biocarvão também contribui para maior estabilidade química do sistema (Figura 14).

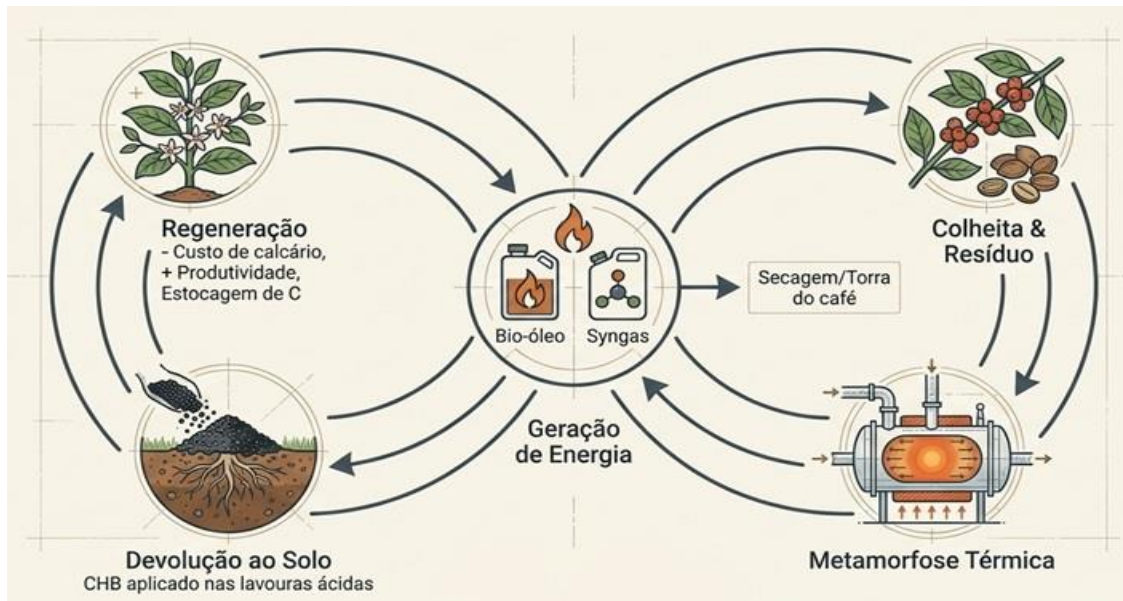


Figura 14. Representação da economia circular e ciclagem de nutrientes via biocarvão na cafeicultura. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Além de favorecer a reciclagem de nutrientes e a estabilidade química do sistema produtivo, o biocarvão exerce efeitos significativos sobre os atributos físicos do solo, ampliando sua capacidade de armazenamento de água e melhorando as condições para o crescimento radicular. Adicionalmente, o biocarvão atua como condicionador da estrutura do solo, promovendo maior aeração, redução da densidade aparente e incremento na capacidade de retenção de água. Esses atributos são particularmente importantes para o desenvolvimento do sistema radicular do cafeeiro, que é sensível à compactação e à limitação hídrica, sobretudo em regiões sujeitas a períodos de veranico (Mukherjee; Lal, 2013; Zacarias *et al.*, 2022).

A interação do biocarvão com a matéria orgânica e a microbiota do solo também apresenta resultados promissores. A elevada porosidade e a grande área superficial do biocarvão favorecem a colonização por microrganismos, estimulando a atividade biológica, a ciclagem de nutrientes e a eficiência no uso de fertilizantes, o que contribui para a sustentabilidade dos sistemas produtivos (Lehmann *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2016; Zacarias *et al.*, 2022).

Embora os efeitos do biocarvão sobre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo sejam predominantemente positivos, alguns aspectos

relacionados ao manejo devem ser considerados para maximizar seus benefícios agrônômicos. Entre eles, destaca-se a possibilidade de ocorrência de imobilização temporária de nitrogênio em materiais com elevada relação C/N, fenômeno associado à intensificação da atividade microbiana após a aplicação (Figura 15).



Figura 15. Representação esquemática dos mecanismos de imobilização temporária de nitrogênio no solo após a aplicação de biocarvão com elevada relação C/N. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A imobilização temporária de nitrogênio associada à aplicação de biocarvão com elevada relação C/N é um fenômeno amplamente reconhecido na literatura científica, resultante da interação entre fatores químicos, físicos e biológicos do solo. Biocarvões com alta relação carbono/nitrogênio disponibilizam grandes quantidades de carbono, estimulando a atividade microbiana. Nesse processo, os microrganismos utilizam o carbono como fonte de energia e passam a demandar nitrogênio mineral do solo para a síntese de sua biomassa, reduzindo temporariamente a disponibilidade desse nutriente para as plantas (Lehmann; Joseph, 2015). Esse efeito tende a ser mais pronunciado em biocarvões produzidos a temperaturas mais baixas, os quais apresentam maior fração de carbono lábil e, conseqüentemente, maior estímulo à atividade microbiana (Spokas *et al.*, 2012).

Esse processo não depende exclusivamente das características do biocarvão, sendo também fortemente influenciado pelas condições ambientais e pelas propriedades do solo. As condições edafoclimáticas exercem papel determinante na intensidade e na duração da imobilização de nitrogênio. Solos com maior disponibilidade hídrica e temperaturas mais elevadas favorecem a atividade biológica, intensificando a assimilação microbiana do nitrogênio mineral. Além disso, a textura do solo também influencia esse fenômeno, uma vez que solos arenosos, por apresentarem menor capacidade de retenção de água e nutrientes, podem intensificar a limitação temporária de nitrogênio disponível às plantas (Novak *et al.*, 2010).

O teor inicial de nitrogênio no solo constitui outro fator determinante, pois em ambientes naturalmente pobres nesse nutriente a competição entre microrganismos e plantas torna-se mais acentuada (Bruun *et al.*, 2012). Soma-se a isso a dose de biocarvão aplicada, sendo que maiores quantidades ampliam a oferta de carbono e, conseqüentemente, o potencial de imobilização microbiana (Steiner *et al.*, 2007).

Apesar desse efeito inicial, práticas de manejo adequadas podem mitigar significativamente a limitação nutricional. A suplementação com fertilizantes nitrogenados, especialmente de forma parcelada, reduz a competição entre plantas e microrganismos e aumenta a eficiência de uso do nutriente (Lehmann; Joseph, 2015).

O pré-condicionamento do biocarvão, por meio de sua compostagem ou mistura com fontes orgânicas, promove o enriquecimento nutricional do material antes da aplicação, diminuindo a intensidade da imobilização inicial (Glaser; Lehmann; Zech, 2002). Adicionalmente, a escolha de biocarvões com menor relação C/N ou maior estabilidade do carbono, bem como sua integração com fontes orgânicas ricas em nitrogênio, contribui para o equilíbrio da dinâmica nutricional do sistema (Novak *et al.*, 2010; Spokas *et al.*, 2012).

Os benefícios decorrentes do manejo adequado do biocarvão refletem-se em melhorias expressivas dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, com impactos positivos sobre a produtividade das culturas, conforme ilustrado na Figura 16.

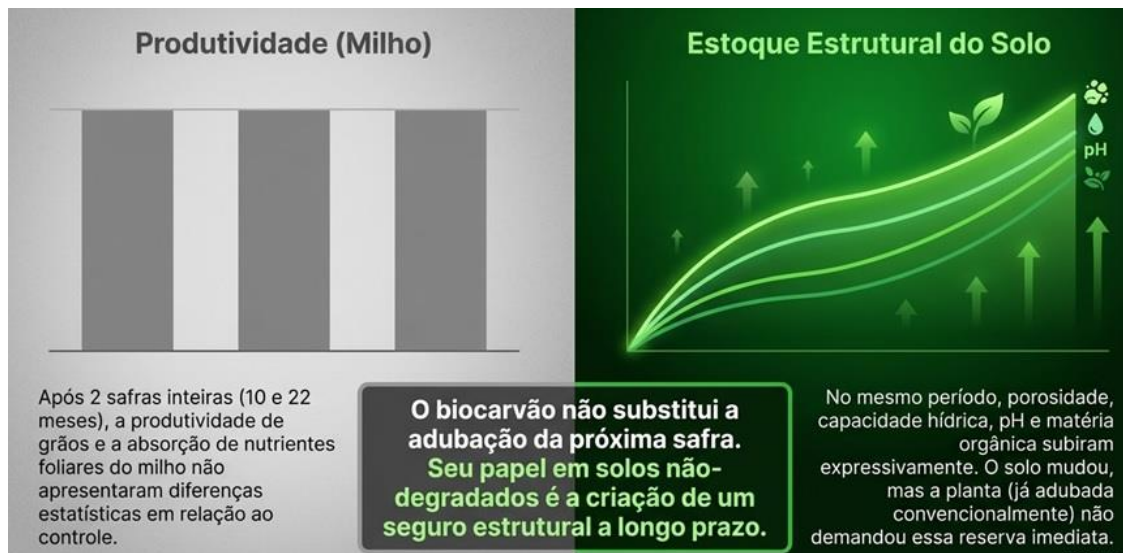


Figura 16. Comparativo entre indicadores de qualidade do solo (C-orgânico e estrutura) e produtividade da cultura sob aplicação de biocarvão. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Além da escolha do tipo de biocarvão e das estratégias de suplementação nutricional, o momento de aplicação também deve ser considerado, sendo recomendável incorporar o biocarvão com antecedência ao plantio, permitindo que o sistema atinja um novo equilíbrio biológico antes das fases de maior demanda nutricional das culturas (Bruun *et al.*, 2012; Souza; Rangel; Passos, 2023). Assim, embora a imobilização de nitrogênio represente um desafio inicial, trata-se de um processo transitório: quando adequadamente manejado, pode contribuir para a melhoria da fertilidade do solo, da eficiência no uso de nutrientes e da sustentabilidade dos sistemas agrícolas em longo prazo (Alvarenga *et al.*, 2023; Souza; Rangel; Passos, 2023).

Outro aspecto relevante refere-se ao potencial da própria cafeicultura como fonte de matéria-prima para a produção de biocarvão, especialmente por meio do aproveitamento da palha de café. Nesse sentido, Alvarenga *et al.* (2023) destacam que a conversão desse resíduo em biocarvão, por meio da pirólise, constitui uma alternativa adequada para seu manejo.

Para esses mesmos autores, a temperatura de pirólise exerce papel determinante nas propriedades do biocarvão, sendo que materiais produzidos entre 400 °C e 600 °C tendem a apresentar maior estabilidade estrutural e

predominância de compostos aromáticos, enquanto temperaturas mais baixas podem resultar na presença de compostos orgânicos voláteis potencialmente indesejáveis. Além de contribuir para a melhoria da qualidade do solo, essa prática pode reduzir problemas fitossanitários, como a proliferação da mosca-dos-estábulo (*Stomoxys calcitrans*), frequentemente associada ao acúmulo inadequado de resíduos orgânicos (Figura 17).

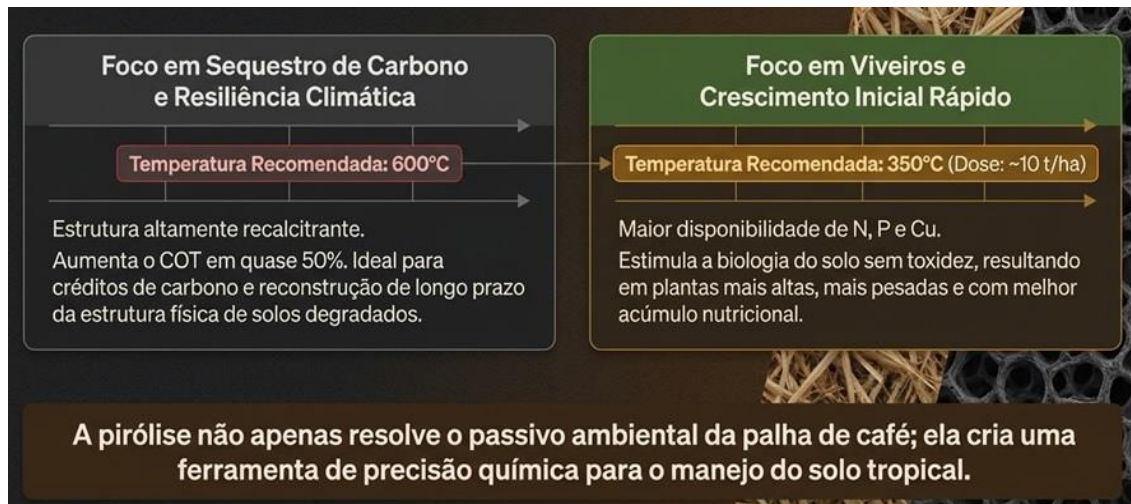


Figura 17. Efeitos da temperatura de pirólise na qualidade do biocarvão produzido a partir da palha de café e suas implicações agronômicas e ambientais. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Além dos benefícios relacionados ao manejo sustentável dos resíduos da cafeicultura e à redução de problemas fitossanitários, a qualidade do biocarvão obtido influencia diretamente sua eficiência agronômica após a aplicação ao solo. Compreender os mecanismos físico-químicos responsáveis por sua atuação é fundamental para explicar seus efeitos sobre a fertilidade do solo e o desenvolvimento das plantas.

Em solos tropicais altamente intemperizados, o biocarvão contribui para a correção da acidez e para o aumento da fertilidade ao elevar o pH por meio da presença de carbonatos, bicarbonatos e cinzas ricas em bases, além de reduzir a toxicidade do alumínio pela complexação com grupos funcionais, como carboxilas ($-\text{COOH}$) e hidroxilas ($-\text{OH}$) (Lehmann; Joseph, 2015). Sua elevada área superficial e a predominância de cargas negativas aumentam a capacidade de troca de cátions (CTC), favorecendo a retenção de potássio (K), cálcio (Ca) e

magnésio (Mg) e reduzindo perdas por lixiviação. Além disso, sua estrutura porosa amplia a retenção de água no solo, contribuindo para maior resiliência das plantas em períodos de déficit hídrico (Paz-Ferreiro *et al.*, 2014; Mukherjee; Lal, 2013; Souza; Rangel; Passos, 2023). A Figura 18 sintetiza os principais mecanismos de produção e atuação do biocarvão, desde o processo de pirólise até seus efeitos físicos, químicos e ambientais nos sistemas agrícolas.



Figura 18. Representação do processo de pirólise em diferentes temperaturas e os benefícios sistêmicos do biocarvão na agricultura. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Conforme ilustrado na Figura 18, além dos benefícios relacionados à melhoria dos atributos físicos e químicos do solo, o processo de pirólise confere ao biocarvão elevada estabilidade estrutural. A formação de estruturas aromáticas durante sua produção aumenta a recalcitrância do material, permitindo que parte do carbono permaneça armazenada no solo por longos períodos e contribuindo para o sequestro de carbono (Woolf *et al.*, 2010; Bekchanova *et al.*, 2024; Enebe *et al.*, 2025).

Além disso, evidências indicam que sua aplicação pode reduzir emissões de gases de efeito estufa, especialmente óxido nitroso (N_2O), e favorecer a conservação do carbono orgânico do solo, reforçando seu papel na mitigação das mudanças climáticas (Woolf *et al.*, 2010; Marin *et al.*, 2025; Adekiya *et al.*, 2026).

Dessa forma, o uso do biocarvão em sistemas cafeeiros configura-se como uma estratégia tecnicamente viável para a conservação do solo, a mitigação de

impactos ambientais e o aumento da eficiência produtiva. Sua adoção, especialmente quando integrada a práticas agroecológicas e ao manejo racional de insumos, reforça o potencial da cafeicultura como atividade alinhada aos princípios da sustentabilidade.

Entretanto, a magnitude desses benefícios não é uniforme, variando em função da qualidade do biocarvão, da matéria-prima utilizada, das condições de pirólise, da dose aplicada, das características edafoclimáticas e das estratégias de manejo adotadas. Assim, para que esse insumo seja utilizado de forma eficiente e segura, torna-se fundamental discutir as diretrizes técnicas que orientam sua produção, aplicação e monitoramento em sistemas cafeeiros, bem como as implicações práticas associadas ao seu uso (Woolf *et al.*, 2010; IBI, 2015; Bekchanova *et al.*, 2024; Shyam *et al.*, 2025; Adekiya *et al.*, 2026).

5. Diretrizes técnicas e implicações práticas do uso do biocarvão em sistemas cafeeiros

A utilização do biocarvão na agricultura tropical, especialmente em sistemas cafeeiros, requer a adoção de diretrizes técnicas que contemplem tanto os processos de produção quanto as estratégias de aplicação e monitoramento no solo. O biocarvão é um material sólido resultante da decomposição termoquímica da biomassa em condições de baixa disponibilidade de oxigênio, processo denominado pirólise, sendo caracterizado por elevada estabilidade e resistência à decomposição (Teixeira *et al.*, 2015).

A qualidade do biocarvão depende da matéria-prima utilizada e das condições de pirólise, especialmente da temperatura. Resíduos lignocelulósicos, como palha e casca de café, apresentam elevado potencial para produzir biocarvão com características agrônômicas favoráveis, sobretudo quando submetidos a temperaturas entre 400 °C e 700 °C, faixa que favorece a formação de estruturas aromáticas estáveis e aumenta a recalcitrância do material no solo (Andrade *et al.*, 2020; Manguti *et al.*, 2020).

A temperatura de pirólise influencia diretamente a composição química e a estrutura física do biocarvão. Temperaturas inferiores a 400 °C preservam maior proporção de compostos lábeis, enquanto temperaturas mais elevadas

favorecem a condensação de estruturas aromáticas, aumentando a estabilidade do carbono no solo. Esse processo também modifica propriedades como área superficial, porosidade e capacidade de adsorção de nutrientes, determinantes para sua eficiência agronômica e ambiental (Lehmann; Joseph, 2015; Bekchanova *et al.*, 2024). A Figura 19 ilustra a influência da temperatura de pirólise sobre o fracionamento do carbono (C) e seus efeitos no incremento do carbono orgânico total (COT) do solo.

A definição da dose de aplicação deve considerar a textura e as propriedades do solo. Em Latossolos argilosos, comuns em regiões cafeeiras, estudos indicam respostas consistentes a doses entre 10 e 50 Mg ha⁻¹, com melhorias graduais na fertilidade e nos atributos físicos do solo ao longo do tempo. Ressalta-se que esses efeitos tendem a se manifestar de forma progressiva, sendo mais expressivos em médio e longo prazo, o que exige alinhamento das expectativas quanto aos resultados produtivos imediatos (Andrade *et al.*, 2020). Em solos arenosos ou de média textura, caracterizados por menor capacidade de retenção hídrica, doses mais elevadas podem ser necessárias para maximizar os efeitos sobre a disponibilidade de água e nutrientes (Freitas *et al.*, 2016).



Figura 19. Esquema do fracionamento do carbono (frações lábeis vs. não lábeis) e impacto da temperatura de 600 °C no incremento do Carbono Orgânico Total (COT). Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A estratégia de aplicação também influencia os resultados agronômicos. Aplicações únicas em doses elevadas tendem a promover incrementos mais rápidos nos estoques de carbono e na melhoria estrutural do solo, porém demandam maior volume de material e investimentos iniciais mais elevados. Em contrapartida, aplicações parceladas ao longo do tempo podem facilitar a logística operacional e a adequação do manejo às condições da propriedade, embora apresentem menor eficiência inicial e possam resultar em custos acumulados superiores ao longo do período de aplicação (Lorenz; Lal, 2014; Andrade *et al.*, 2020; Souza; Rangel; Passos, 2023).

Em sistemas cafeeiros, recomenda-se a incorporação do biocarvão na camada de 0,00-0,20 m, região de maior atividade radicular e interação com fertilizantes. Cabe destacar que o biocarvão não deve ser considerado um fertilizante direto, mas sim um condicionador de solo, cuja principal função é aumentar a eficiência do uso de nutrientes e promover melhorias estruturais, físicas e químicas ao longo do tempo.

Embora os benefícios do biocarvão sejam amplamente reconhecidos na literatura, sua aplicação prática ainda é cercada por interpretações equivocadas e expectativas muitas vezes incompatíveis com sua real função agrônômica. Frequentemente, o biocarvão é confundido com um fertilizante convencional de efeito imediato, quando, na realidade, atua predominantemente como condicionador do solo, promovendo melhorias graduais nos atributos físicos, químicos e biológicos do sistema. Nesse sentido, compreender sua forma de aplicação, seus mecanismos de ação na zona radicular e as limitações associadas ao seu uso, são fundamentais para maximizar seus benefícios. A Figura 20 apresenta uma síntese dos principais conceitos, evidências científicas e equívocos frequentemente associadas à utilização do biocarvão em sistemas agrícolas.

Além dos aspectos relacionados ao manejo e à aplicação do biocarvão no solo, outro fator estratégico refere-se à origem da biomassa utilizada em sua produção. A integração do biocarvão em estratégias de economia circular constitui um diferencial relevante. Subprodutos da cafeicultura, tais como casca, palha e resíduos de poda, podem ser convertidos em biocarvão, reduzindo o passivo ambiental e promovendo a geração de insumos dentro da própria

unidade produtiva. Além disso, a pirólise desses resíduos favorece a retenção de nutrientes, como o potássio, na matriz do biocarvão, reduzindo perdas por lixiviação e aumentando sua eficiência agrônômica (Andrade *et al.*, 2020).

O que o mercado diz (Mito)	O que a ciência prova (Evidência)
 Substitui o fertilizante mineral instantaneamente.	 Trabalha em sinergia com o fertilizante mineral NPK, retendo os íons nos seus poros e impedindo a lixiviação.
 Aumenta exponencialmente a safra no 1º ano.	 Em solos tropicais já produtivos, a planta estabiliza; o ganho de curto prazo é na saúde física do solo (densidade e retenção de água).
 Todo biocarvão atua da mesma forma.	 Biomassa dita eficácia. Matérias-primas de mata nativa (desmatamento) apresentam qualidade química inferior a resíduos agrícolas.

Figura 20. Esquema de aplicação do biocarvão na zona radicular: mitos e evidências. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Antes da aplicação em larga escala, recomenda-se a realização de testes de qualidade, como ensaios de germinação, visando identificar possíveis efeitos fitotóxicos decorrentes de processos de pirólise inadequados. Esse procedimento é essencial para garantir a segurança do uso do biocarvão e evitar prejuízos ao desenvolvimento inicial das plantas (Teixeira *et al.*, 2015).

Além dos aspectos relacionados ao monitoramento dos efeitos do biocarvão no solo, é fundamental considerar a qualidade e a segurança da matéria-prima utilizada em sua produção, uma vez que resíduos agrícolas manejados inadequadamente podem representar riscos agrônômicos e fitossanitários. No estado do Espírito Santo, a utilização direta da casca de café in natura na lavoura tem sido restringida por órgãos ambientais e de defesa agropecuária devido aos riscos associados a esse resíduo.

A casca de café pode atuar como importante fonte de inóculo para pragas e patógenos, destacando-se a broca-do-café, cuja disseminação pode ser favorecida pelo manejo inadequado dos resíduos da pós-colheita. Além disso, sua decomposição no solo pode provocar fermentações indesejáveis, liberação de compostos potencialmente tóxicos e desequilíbrios nutricionais,

especialmente relacionados à imobilização de nitrogênio, comprometendo o desenvolvimento inicial das plantas (Matiello *et al.*, 2010; Guimarães *et al.*, 2016; Alvarenga *et al.*, 2023; Enebe *et al.*, 2025).

Outro aspecto relevante refere-se ao potencial poluidor desse resíduo quando manejado de forma inadequada. A casca de café apresenta elevada carga orgânica e pode gerar lixiviados ricos em compostos fenólicos e potássio, os quais, ao atingirem corpos d'água, contribuem para processos de eutrofização e degradação ambiental. Por essa razão, normas técnicas e recomendações agrônômicas têm desencorajado sua aplicação direta no campo, priorizando formas de tratamento capazes de reduzir esses impactos. Nesse contexto, a restrição não representa uma limitação ao aproveitamento do resíduo, mas sim uma orientação para seu uso mais seguro, eficiente e ambientalmente adequado.

Diante dos potenciais riscos associados ao uso inadequado de resíduos orgânicos na cafeicultura, torna-se fundamental adotar critérios técnicos que orientem sua transformação e aplicação no sistema produtivo. Nesse contexto, a conversão da biomassa residual em biocarvão representa uma alternativa capaz de reduzir riscos fitossanitários, minimizar impactos ambientais e aumentar a estabilidade do carbono incorporado ao solo. Entretanto, a eficiência dessa estratégia depende da avaliação prévia da matéria-prima, das condições de processamento e das características do ambiente de aplicação. A adoção de protocolos técnicos e de boas práticas de manejo constitui etapa essencial para garantir que os benefícios agrônômicos e ambientais do biocarvão sejam plenamente alcançados (Lehmann; Joseph, 2015; IBI, 2015; Bekchanova *et al.*, 2024). A Figura 21 apresenta um fluxograma com as principais diretrizes técnicas e etapas de decisão para sua utilização segura em sistemas cafeeiros.

O monitoramento dos efeitos do biocarvão no solo deve ser realizado por meio de análises químicas e físicas em diferentes profundidades, permitindo avaliar a evolução dos atributos do solo ao longo do tempo. Técnicas complementares, como a análise isotópica do carbono, podem ser empregadas para diferenciar o carbono pirogênico do carbono orgânico nativo, contribuindo para a avaliação do sequestro de carbono (Andrade *et al.*, 2020).

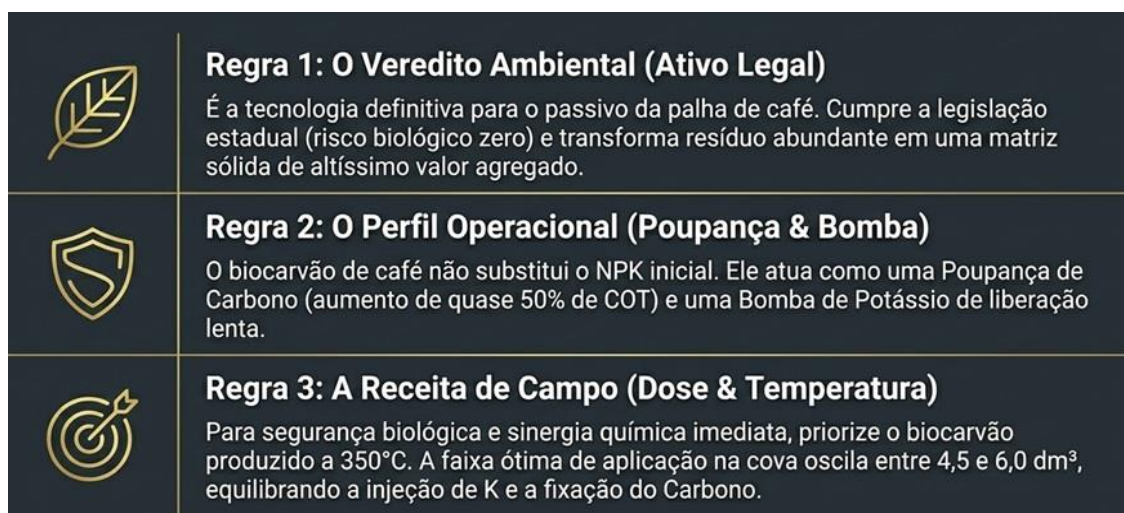


Figura 21. Fluxograma de segurança e diretrizes estratégicas para aplicação de biocarvão na cafeicultura. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Embora a casca de café represente uma matéria-prima promissora para a produção de biocarvão, seu uso direto na lavoura demanda cuidados específicos. Quando manejado inadequadamente, esse resíduo pode favorecer a disseminação de pragas e patógenos, além de contribuir para impactos ambientais associados à elevada carga orgânica e à geração de lixiviados. Dessa forma, torna-se importante compreender os principais riscos agrônômicos, fitossanitários e ambientais relacionados à utilização da casca de café *in natura*, bem como as limitações legais associadas ao seu manejo, conforme ilustrado na Figura 22.



Figura 22. Esquema dos riscos da casca de café *in natura* e o gargalo legal no Espírito Santo. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Diante desse cenário, o biocarvão surge como uma alternativa promissora para o aproveitamento da casca de café, convertendo um resíduo potencialmente problemático em um insumo de alto valor agronômico. Por meio do processo de pirólise, a casca é transformada em um material estável, com elevada capacidade de retenção de água e nutrientes, além de menor risco de contaminação biológica. O uso do biocarvão contribui para a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, além de reduzir a emissão de gases de efeito estufa e promover a ciclagem de nutrientes em sistemas agrícolas sustentáveis (Novak *et al.*, 2010; Lehmann; Joseph, 2015). Assim, a conversão da casca de café em biocarvão representa uma estratégia alinhada aos princípios da agroecologia e da economia circular, especialmente relevante para a cafeicultura capixaba.

Dessa forma, a adoção de diretrizes técnicas para a produção e aplicação do biocarvão é fundamental para maximizar seus benefícios agronômicos e ambientais. Quando adequadamente manejado, o biocarvão constitui uma ferramenta estratégica não apenas para a melhoria da qualidade do solo, mas também para a construção de sistemas cafeeiros mais resilientes, eficientes no uso de recursos e alinhados às demandas da agricultura de baixo carbono (Figura 23).



Figura 23. Infográfico de síntese estratégica: pilares para a construção de sistemas cafeeiros resilientes e de baixo carbono. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A síntese apresentada na Figura 23 evidencia que os benefícios do biocarvão transcendem a simples melhoria de atributos isolados do solo, abrangendo dimensões produtivas, ambientais e climáticas. Quando associado a práticas adequadas de manejo e ao aproveitamento sustentável de resíduos da própria atividade cafeeira, esse insumo contribui para o fortalecimento da resiliência dos agroecossistemas e para a consolidação de modelos produtivos mais eficientes e sustentáveis. Nesse contexto, os resultados discutidos ao longo deste capítulo fornecem subsídios importantes para a compreensão do potencial do biocarvão na cafeicultura, servindo de base para as reflexões apresentadas nas considerações.

6. Considerações

A viabilização do uso do biocarvão na agricultura está diretamente relacionada à qualidade da biomassa utilizada, às condições do processo de pirólise e à logística de produção, transporte e aplicação no campo. A padronização desses fatores é essencial para garantir a eficiência agrônômica, a segurança ambiental e a previsibilidade dos resultados obtidos. Além disso, a presença potencial de contaminantes, como metais pesados e compostos orgânicos indesejáveis, reforça a necessidade de protocolos rigorosos de caracterização e controle de qualidade. Nesse contexto, a elevada estabilidade do carbono presente no biocarvão constitui um importante mecanismo de sequestro de carbono no solo, conferindo relevância estratégica a esse material no enfrentamento das mudanças climáticas e na transição para sistemas agrícolas de baixo carbono.

O uso do biocarvão na formulação de fertilizantes organominerais e substratos agrícolas representa uma alternativa promissora para aumentar a eficiência no uso de nutrientes. Sua elevada capacidade de adsorção, associada à liberação gradual dos elementos minerais, contribui para a redução de perdas por lixiviação e volatilização, favorecendo maior aproveitamento dos nutrientes pelas plantas. Entretanto, a resposta agrônômica depende das características do biocarvão, especialmente de sua relação C/N, que pode influenciar a dinâmica do nitrogênio no solo e exigir ajustes no manejo da adubação, sobretudo nas fases iniciais após a aplicação.

Na cafeicultura, esses efeitos assumem maior relevância devido à predominância de solos ácidos, frequentemente caracterizados por baixa fertilidade natural e limitada capacidade tampão. Nesses ambientes, o biocarvão atua não apenas na elevação do pH, mas também na estabilização química do solo, contribuindo para a redução da toxicidade por alumínio, para o aumento da eficiência do uso de nutrientes e para a ampliação da capacidade de retenção de água. Esse último aspecto é particularmente importante em regiões sujeitas a períodos de déficit hídrico e veranicos, uma vez que favorece maior resiliência das plantas frente às oscilações climáticas. Além disso, sua persistência no solo, associada à elevada estabilidade do carbono e à presença de grupos funcionais reativos, possibilita efeitos duradouros sobre a qualidade do solo quando comparados aos obtidos por práticas corretivas convencionais.

Outro aspecto relevante refere-se ao potencial do biocarvão como destino sustentável para resíduos agroindustriais. No contexto da cafeicultura, subprodutos como cascas, palhas e resíduos de poda podem ser convertidos em biocarvão por meio de pirólise controlada, cujas condições térmicas influenciam diretamente a qualidade do produto final. Essa estratégia reduz o passivo ambiental, promove a economia circular e possibilita a geração de insumos dentro da própria unidade produtiva, fortalecendo a autonomia dos sistemas produtivos e agregando valor a materiais que, de outra forma, poderiam representar fontes de contaminação ambiental ou riscos fitossanitários.

Do ponto de vista agrônomo, é importante destacar que o biocarvão deve ser compreendido como um condicionador de solo de efeito cumulativo, e não como um insumo de resposta imediata. Seus benefícios tendem a se manifestar de forma progressiva, especialmente em médio e longo prazo, o que exige planejamento e alinhamento das expectativas por parte dos produtores. Assim, sua utilização deve estar integrada a um conjunto mais amplo de práticas de manejo, incluindo adubação equilibrada, cobertura do solo, conservação da matéria orgânica e manejo adequado da água. Adicionalmente, o biocarvão pode favorecer a atividade microbiana e a ciclagem de nutrientes, reforçando processos biológicos essenciais à manutenção da qualidade do solo e ao funcionamento sustentável dos agroecossistemas.

Do ponto de vista econômico e ambiental, o uso do biocarvão pode estar associado a oportunidades emergentes, como a geração de créditos de carbono e a inserção em mercados que valorizam práticas produtivas sustentáveis. A crescente demanda por sistemas agrícolas capazes de conciliar produtividade, conservação ambiental e mitigação climática tende a ampliar o interesse por tecnologias baseadas no sequestro de carbono e na valorização de resíduos orgânicos. Contudo, sua adoção em larga escala ainda depende de fatores como custo de produção, disponibilidade tecnológica, capacitação técnica, infraestrutura adequada e comprovação de resultados consistentes em diferentes condições edafoclimáticas, especialmente em sistemas cafeeiros tropicais.

Apesar do potencial promissor, persistem lacunas científicas relevantes, especialmente quanto aos efeitos de longo prazo do biocarvão, à variabilidade de respostas em diferentes classes de solo, às interações com fertilizantes e corretivos e aos possíveis impactos ecotoxicológicos associados à sua utilização continuada. Adicionalmente, destaca-se a necessidade de padronização metodológica em experimentos de campo, condição fundamental para aumentar a comparabilidade entre estudos, reduzir incertezas e ampliar a robustez das recomendações técnicas destinadas aos produtores.

Por fim, a consolidação do biocarvão como tecnologia agrícola sustentável depende da integração entre pesquisa científica, inovação tecnológica, extensão rural e políticas públicas. A criação de marcos regulatórios, programas de incentivo, linhas de financiamento e estratégias de transferência de tecnologia será determinante para ampliar sua adoção em diferentes escalas produtivas. Nesse cenário, o biocarvão configura-se como uma ferramenta estratégica para a construção de sistemas cafeeiros mais resilientes, eficientes no uso de recursos, ambientalmente responsáveis e alinhados às demandas contemporâneas de sustentabilidade, agricultura regenerativa e produção de baixo carbono.

7. Referências

ADEKIYA, A. O.; IBABA, A. L.; OGUNBODE, T. O.; ADEDOKUN, O. D. Biochar: a sustainable solution for mitigating greenhouse gas emissions and enhancing

soil productivity: a review. **Scientifica**, v. 2026, artigo 5690423, 2026. DOI: 10.1155/sci5/5690423.

AHMAD, M.; RAJAPAKSHA, A. U.; LIM, J. E.; ZHANG, M.; BOLAN, N.; MOHAN, D.; VITHANAGE, M.; LEE, S. S.; OK, Y. S. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. **Chemosphere**, v. 99, p. 19-33, 2014.

ALBURQUERQUE, J. A.; SALAZAR, P.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; DEL CAMPILLO, M. C.; GALLARDO, A.; VILLAR, R. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 33, p. 475-484, 2013.

ALVARENGA, A. C.; PASSOS, R. R.; ANDRADE, F. V.; MENDONÇA, E. de S.; RANGEL, O. J. P.; MOSA, L. L. Chemical attributes of an Oxisol added with conilon coffee straw biochar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.58, e03019, 2023.

ANDRADE, C. A. de; COSCIONE, A. R.; CHIBA, M. K.; PIRES, A. M. M.; MELO, L. C. A. **Biocarvão de resíduos agrícolas e urbanos**: potencial de uso agrícola e no sequestro de carbono. Campinas: Instituto Agronômico, 2020. 36 p. (Série Tecnologia IAC, 116).

BEKCHANOVA, M.; KUPPENS, T.; CUYPERS, A.; JOZEFCEZAK, M.; MALINA, R. Biochar's effect on the soil carbon cycle: a rapid review and meta-analysis. **Biochar**, v. 6, artigo 88, 2024. DOI: 10.1007/s42773-024-00381-8.

BRUUN, E. W.; HAMBURG, S. P.; EGSGAARD, H.; HAUGGAARD-NIELSEN, H. Biochar effect on the mineralization of soil organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 46, p. 1-8, 2012. DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.09.006.

CARNEIRO, J. S. S.; RIBEIRO, I. C. A.; NARDIS, B. O.; BARBOSA, C. F.; LUSTOSA FILHO, J. F.; MELO, L. C. A. Long-term effect of biochar-based fertilizers application in tropical soil: agronomic efficiency and phosphorus availability. **Science of the Total Environment**, v. 732, p. 143955, 2021.

CHEN, T.; ZHANG, Y.; WANG, H.; LI, W.; ZHOU, Z.; YUANCHENG; RONG, L. CONESA, J. A.; FONT, R.; FULLANA, A.; MARTÍN-GULLÓN, I.; ARACIL, I.; D.; VITHANAGE, M.; LEE, S. S.; OK, Y. S. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. **Chemosphere**, v. 99, p. 19-33, 2014.

CONESA, J. A.; FONT, R.; MARCILLA, A.; GARCÍA, A. N. Pyrolysis of sewage sludge: influence of temperature on product yield and composition. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 85, n. 1-2, p. 134-141, 2009.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Aproveitamento de resíduos da agroindústria do café**. Brasília: Embrapa, 2013.

ENEBE, M. C.; RAY, R. L.; GRIFFIN, R. W. The impacts of biochar on carbon sequestration, soil processes, and microbial communities: a review. **Biochar**, v. 7, artigo 107, 2025. DOI: 10.1007/s42773-025-00499-3.

FALCÃO, N. P. S.; CLEMENT, C. R.; TSAI, S. M.; COMERFORD, N. B. Pedology, fertility, and biology of Central Amazonian Dark Earths. In: WOODS, W. I. et al. (org.). **Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's vision**. Dordrecht: Springer, 2009. p. 213-238.

FERREIRA, F. J. P.; SANTO, L. M. do E.; SANTOS, C. A. dos; BREDA, F. A. da F.; SOUZA, C. da C. B.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. Efeito da adição de biocarvão na eficiência do processo de compostagem da cama de frango. **Anais... 6º Simpósio ABC (Argentina-Brasil-Cuba)**, p. 92-98, 2017.

FREITAS, P. S. L. de; IVONILSON, L.; REZENDE, R.; FRIZZONE, J. A. Influência da aplicação de biochar nas propriedades físicas e hídricas de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, v. 3, n. 4, p. 54-61, 2016.

GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: a review. **Biology and Fertility of Soils**, v. 35, n. 4, p. 219-230, 2002.

GUIMARÃES, P. T. G.; REIS, T. H. P.; MARTINEZ, H. E. P. **Cafeeiro: manejo da fertilidade do solo e adubação**. Brasília, DF: Embrapa, 2022.

GUIMARÃES, R. J.; MENDES, A. N. G.; SOUZA, C. A. S. **Cafeicultura: técnicas de produção sustentável**. Lavras: UFLA, 2016.

IBI. International Biochar Initiative. **Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil**, 2015. Disponível em: https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2020/06/IBI_Biochar_Standards_V2.1_Final2.pdf. Acesso em: 22 abr. 2026.

JIEN, S. H.; WANG, C. S. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. **Catena**, v. 110, p. 225–233, 2013.

KOOKANA, R. S. The role of biochar in modifying the environmental fate, bioavailability, and efficacy of pesticides in soils: a review. **Australian Journal of Soil Research**, v. 48, n. 7, p. 627-637, 2010.

LEHMANN, J. Bio-energy in the black. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 5, n. 7, p. 381-387, 2009.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management: Science technology and implementation**. 2. ed. Nova York: Routledge, 2015.

LEHMANN, J.; RILLIG, M. C.; THIES, J.; MASIELLO, C. A.; HOCKADAY, W. C.; CROWLEY, D. Biochar effects on soil biota: a review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 9, p. 1812–1836, 2011.

LIANG, B.; LEHMANN, J.; SOLOMON, D.; KINYANGI, J.; GROSSMAN, J.; O'NEILL, B.; SKJEMSTAD, J. O.; THIES, J.; LUIZAO, F. J.; PETERSEN, J.; NEVES, E. G. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 5, p. 1719-1730, 2006.

LIMA, A. M.; CHAVES, L. H. G.; FERNANDES, J. D.; MONTEIRO FILHO, A. F.; CORRÊA, É. B.; DUARTE, M. S. B.; KUBO, G. T. M.. Phosphorus adsorption after the incubation of clay soil with different doses of biochar. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 48, e016724, 2024.

LORENZ, K.; LAL, R. Biochar application to soil for climate change mitigation by soil organic carbon sequestration. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 177, n. 5, p. 651-670, 2014.

MACEDO, I.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. Greenhouse gas emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n. 7, p. 582–595, 2008.

MAJOR, J.; RONDON, M.; MOLINA, D.; RIHA, S. J.; LEHMANN, J. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. **Plant and Soil**, v. 333, n. 1-2, p. 117–128, 2010.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFOS, 1997. Acesso em: 22 abr. 2026.

MANGUTI, V.; CELESTINO, C. A.; OLIVEIRA, F. C. C.; ALVES, P. R. L.; MELO, L. C. A. Biochar selection for sustainable agriculture: a carbon stability and nutrient availability approach. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 77, n. 2, e20180214, 2020. DOI: 10.1590/1678-992X-2018-0214.

MARIN, F.; TANISLAV, O. M.; CONSTANTINESCU, M.; ROMAN, A.; BUCURA, F.; OANCEA, S.; ZAHARIOIU, A. M. Biochar for soil fertility and climate mitigation: review on feedstocks, pyrolysis conditions, functional properties, and applications with emerging AI integration. **Agriculture**, v. 15, n. 22, artigo 2345, 2025. DOI: 10.3390/agriculture15222345.

MATIELLO, J. B.; SANTINATO, R.; GARCIA, A. W. R.; ALMEIDA, S. R.; FERNANDES, D. R. **Cultura de café no Brasil: manual de recomendações**. Varginha, MG: Fundação Procafé, 2020. 714 p.

MATIELLO, J. B.; SANTINATO, R.; GARCIA, A. W. R.; ALMEIDA, S. R.; FERNANDES, D. R. **Cultura de café no Brasil: manual de recomendações**. Rio de Janeiro: MAPA/PROCAFÉ, 2010.

MELO, M. R. P. **Biochar como aditivo no processo de compostagem**. 2019. 94 f. Dissertação (Mestrado Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Federal do Triângulo Mineiro, 2019.

MOURA, D. L.; PASSOS, R. R.; RANGEL, O. J. P.; SOUZA, C. O.; FERREIRA, A. F.; RIBEIRO, I. C. A. Biochar as a soil conditioner in coffee cultivation systems: a review. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 323, p. 107697, 2022.

MUKHERJEE, A.; LAL, R. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. **Agronomy**, v. 3, n. 2, p. 313–339, 2013.

NOVAK, J. M.; BUSSCHER, W. J.; LAIRD, D. L.; AHMEDNA, M.; WATTS, D. W.; NIANDOU, M. A. S. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. **Soil Science, Baltimore**, v. 175, n. 2, p. 105–112, 2010. DOI: 10.1097/SS.0b013e3181cb7f37.

NOVOTNY, E. H.; MAIA, C. M. B. F.; CARVALHO, M. T. M.; MADARI, B. E. Biochar: pyrogenic carbon for agricultural use a critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 321–344, 2015.

OLIVEIRA, F. S. DE; DESTEFANI, J. D.; , TAVARES, L. R.; PÁSCHOA, J. C. V. DA; CRESPO, A. M.; ARAUJO, O. P.; PEIXOTO, P. M. C.; SIQUEIRA, C. B.; CORTAT, L. H.; SOUZA, M. N. Microrganismos simbiotes: fixação biológica de nitrogênio e recuperação de pastagens degradadas. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas**. Vol. II. Canoas: Mérida Publishers Ltda. 2021. p. 243-275. <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-994457-2-9.c6>

PAZ-FERREIRO, J.; LU, H.; FU, S.; MÉNDEZ, A.; GASCÓ, G. Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils: a review. **Solid Earth**, v. 5, n. 1, p. 65–75, 2014.

PRADO, R. M.; NATALE, W.; ROZANE, D. E. **Nutrição, calagem e adubação do cafeeiro**. Piracicaba: Oficina de Textos, 2021.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011.

REICHERT, J. M.; NORTON, L. D.; HUANG, C. Settling velocity of soil aggregates. **Soil and Tillage Research**, v. 94, n. 1, p. 46–55, 2007.

SHYAM, S.; AHMED, S.; JOSHI, S. J.; SARMA, H. Biochar as a soil amendment: implications for soil health, carbon sequestration, and climate resilience. **Discover Soil**, v. 2, artigo 18, 2025. DOI: 10.1007/s44378-025-00041-8.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F. *et al.* (org.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

SILVA, L. C. R.; CORRÊA, R. S.; WRIGHT, J. L.; BOMFIM, B.; HENDRICKS, L.; GAVIN, D. G.; MUNIZ, A. W.; MARTINS, G. C.; MOTTA, A. C. V.; BARBOSA, J. Z.; MELO, V. de F.; YOUNG, S. D.; BROADLEY, M. R.; SANTOS, R. V. A new hypothesis for the origin of Amazonian Dark Earths. **Nature Communications**, v. 12, Art. 127, 2021.

SOUZA, C. de O.; RANGEL, O. J. P.; PASSOS, R. R. **Biocarvões como condicionadores dos atributos do solo**. In: RANGEL, O. J. P. *et al.* (org.). **Tópicos em Agroecologia**. v. 4. Alegre: Ifes, 2023. cap. 16, p. 225-240.

SOUZA, C. de O.; SILVA, M. A. B. da; RANGEL, O. J. P.; SOUZA, M. N. Dinâmica da matéria orgânica em diferentes sistemas de manejo do solo. In: RANGEL, O. J. P. *et al.* (org.). **Tópicos em agroecologia: volume V**. Vitória: Edifes Acadêmico, 2026. p. 146-155. Disponível em:

<http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/1174889>. ISBN: 978-65-5331-162-6. DOI: 10.36524/978-65-5331-162-6.

SOUZA, M. N. Conversão da agricultura convencional para agroecológica. In: SOUZA, M. N. **Agroecologia: a sustentabilidade verde - da agricultura convencional à transformação agroecológica**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026. p. 123-130. ISBN: 978-65-84548-44-2. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-44-2.c7>.

SOUZA, M. N.; SIMÃO, J. B. P. **Tópicos em cafeicultura Vol. IV – Cafés Especiais**. Canoas: RS. Mérida Publishers. 258 p. 2024. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-28-8>.

SPOKAS, K. A.; CANTRELL, K. B.; NOVAK, J. M.; ARCHER, D. W.; IPPOLITO, J. A.; COLLINS, H. P.; BOATENG, A. A.; LIMA, I. M.; LAMMIRATO, C.; AHMEDNA, M.; NIANDOU, M. A. S. Biochar: a synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 41, n. 4, p. 973-989, 2012. DOI: 10.2134/jeq2011.0069.

STEINER, C.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; NEHLS, T.; MACÊDO, J. L. V.; BLUM, W. E. H.; ZECH, W. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 291, n. 1-2, p. 275–290, 2007. DOI: 10.1007/s11104-007-9193-9.

TAN, C.; ZHANG, Y.; WANG, H.; LU, W.; ZHOU, Z.; ZHANG, Y.; REN, L. Influence of pyrolysis temperature on characteristics and heavy metal adsorption performance of biochar derived from municipal sewage sludge. **Bioresource Technology**, v. 164, p. 47–54, 2014.

TEIXEIRA, W. G.; LOPES, A. F.; MADARI, B. E.; MARIMON JUNIOR, B. H. **Biocarvão como condicionador de solo: processos de produção, caracterização e utilização**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2015. 172 p.

TORRES, G. N.; AMORIM, R. S.; FARIA, O. C. O. Water retention in sandy soils of different origins with the addition of biochar. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 37, e11792, 2024.

WOOLF, D.; AMONETTE, J. E.; STREET-PERROTT, F. A.; LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Sustainable biochar to mitigate global climate change. **Nature Communications**, v. 1, n. 56, 2010.

ZACARIAS, A. J.; PASSOS, R. R.; RANGEL, O. J. P.; SANTOS, D. A.; SARTORI, A. F.; SOUZA, M. N.; REPOSSI, B. F. Biocarvão como condicionador do solo cultivado com eucalipto In: **Tópicos em Agroecologia vol. III**. 1 ed. VITÓRIA: Edifes, 2022, v.3, p. 299-315.

ZHANG, A.; BIAN, R.; PAN, G.; CUI, L.; HUSSAIN, Q.; LI, L. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: a field study of two consecutive rice-growing cycles. **Field Crops Research**, v. 127, p. 153-160, 2016.

ZHAO, X.; WANG, J.; WANG, S.; XING, G. Successive straw biochar application as a strategy to sequester carbon and improve fertility: a pot experiment with two rice/wheat rotations in China. ***Plant and Soil***, v. 378, p. 279–294, 2014.

CAPÍTULO 4

Economia circular e manejo sustentável de resíduos na cadeia produtiva do café

Karenn Zavarize Bermond, Dayane Vitória Silva Mello, Rony Mendes Rodrigues, Sara de Oliveira Olimpio, Isabela Berbert da Guia, Tamiris da Silva Gumiere, Willian Moreira da Costa, Maurício Novaes Souza

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-46-6.c4>

Resumo

O Brasil destaca-se como o maior exportador e um dos principais consumidores de café do mundo, atividade de elevada importância econômica, social e cultural. Entretanto, a produção e o processamento dos frutos geram expressivas quantidades de resíduos sólidos, líquidos e orgânicos que, quando manejados inadequadamente, podem provocar contaminação do solo e dos recursos hídricos, emissão de gases de efeito estufa e desperdício de biomassa com elevado potencial de aproveitamento. Nesse contexto, o presente capítulo analisa estratégias sustentáveis para o manejo e a valorização dos resíduos gerados na cadeia produtiva do café, com ênfase nos princípios da economia circular e da agroecologia. São discutidas alternativas como compostagem, produção de biofertilizantes, fertirrigação com água residuária, utilização de biochar, geração de energia a partir da biomassa e integração com sistemas agroflorestais. Essas práticas promovem a ciclagem de nutrientes, a melhoria da qualidade física, química e biológica do solo, a redução da dependência de insumos externos e a mitigação dos impactos ambientais associados à atividade cafeeira. Além dos benefícios ambientais, o reaproveitamento dos resíduos contribui para a redução de custos produtivos, agregação de valor aos subprodutos e fortalecimento da sustentabilidade econômica e social das propriedades rurais. Conclui-se que a transformação de resíduos em recursos constitui uma estratégia fundamental para a construção de sistemas cafeeiros mais resilientes, eficientes e alinhados às demandas contemporâneas de sustentabilidade.

Palavras-chave: Economia circular. Agroecologia. Compostagem. Fertirrigação. Biofertilizantes. Sustentabilidade.

1. Introdução

O Brasil ocupa posição de destaque no cenário mundial da cafeicultura, sendo reconhecido como o maior exportador e um dos maiores consumidores de café do planeta. A atividade cafeeira possui elevada relevância econômica, social e cultural, contribuindo significativamente para a geração de emprego, renda e desenvolvimento regional, especialmente em estados produtores como Minas Gerais, Espírito Santo e São Paulo (ABIC, 2025; CECAFÉ, 2025).

Segundo dados do Conselho dos Exportadores de Café do Brasil (CECAFÉ, 2025), o país alcançou, em 2024, um recorde histórico de exportações, totalizando 50,4 milhões de sacas de 60 kg enviadas para 116 países, representando crescimento de 28,5% em relação ao ano anterior. Paralelamente, o consumo interno também se mantém elevado. De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Café (ABIC, 2025), entre novembro de 2023 e outubro de 2024, o consumo nacional atingiu aproximadamente 21,9 milhões de sacas industrializadas, com média anual de 5,01 kg de café torrado por habitante.

Entretanto, o crescimento da cadeia produtiva do café também intensifica a geração de resíduos sólidos, líquidos e orgânicos provenientes das diferentes etapas de cultivo, processamento, beneficiamento e industrialização dos grãos. Entre os principais resíduos gerados destacam-se cascas, polpas, mucilagem, águas residuárias do processamento, embalagens plásticas e resíduos provenientes da torrefação (Murthy; Naidu, 2012; Maciel *et al.*, 2020; Cardozo *et al.*, 2024).

Estima-se que apenas uma pequena parcela do fruto seja efetivamente aproveitada para a produção da bebida, enquanto grande parte da biomassa gerada transforma-se em resíduo ao longo do processamento. Nesse contexto, resíduos orgânicos oriundos da cafeicultura podem representar importante fonte de poluição ambiental quando descartados inadequadamente, ocasionando contaminação do solo e dos recursos hídricos, emissão de gases de efeito estufa, proliferação de microrganismos e geração de odores desagradáveis (Pandey *et al.*, 2000; Janissen; Huynh, 2018; Cardozo *et al.*, 2024).

Além dos impactos e externalidades ambientais, o manejo inadequado dos resíduos pode comprometer a sustentabilidade econômica da atividade,

aumentando custos relacionados ao tratamento, transporte e disposição final desses materiais. Em contrapartida, o reaproveitamento de resíduos da cadeia produtiva do café apresenta elevado potencial para geração de biofertilizantes, compostagem, produção de energia, alimentação animal e aplicação em sistemas agroecológicos, contribuindo para a economia circular e para a redução da dependência de insumos externos (Mussatto *et al.*, 2011; Silva; Souza, 2021). Nessa perspectiva, os resíduos deixam de ser considerados passivos ambientais e passam a constituir recursos capazes de retornar ao sistema produtivo, promovendo o fechamento dos ciclos de matéria e energia (Figura 1).



Figura 1. Transição do modelo de economia linear para o modelo de economia circular na cadeia produtiva do café. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A dinâmica apresentada na Figura 1 evidencia a transição de um modelo linear, baseado na extração, utilização e descarte de recursos, para um modelo circular, no qual os resíduos são reinseridos nos processos produtivos por meio da reciclagem, compostagem, geração de energia e produção de insumos agrícolas. Essa abordagem contribui para a redução dos impactos ambientais, para o aumento da eficiência no uso dos recursos naturais e para a agregação de valor aos subprodutos da cafeicultura (Mendonça *et al.*, 2026).

Diante desse cenário, práticas sustentáveis de manejo e reaproveitamento de resíduos tornam-se fundamentais para promover uma cafeicultura

ambientalmente responsável, socialmente justa e economicamente viável. A adoção dessas estratégias está alinhada aos princípios do desenvolvimento sustentável e às demandas contemporâneas por sistemas produtivos mais resilientes e conservacionistas (FAO, 2023; Faria *et al.*, 2023; Mendonça *et al.*, 2026).

Dessa forma, o presente capítulo tem como objetivo apresentar as principais fontes de resíduos gerados na cadeia produtiva do café, bem como discutir alternativas sustentáveis para seu manejo e reaproveitamento. Busca-se evidenciar o potencial desses subprodutos para a redução dos impactos ambientais, a promoção da economia circular e o fortalecimento da sustentabilidade econômica, social e ambiental da cafeicultura.

2. Produção de resíduos na cadeia do café

A cadeia produtiva do café envolve diversas etapas, desde o cultivo e manejo das lavouras até o processamento, beneficiamento, industrialização e consumo final da bebida. Em todas essas fases ocorre a geração de resíduos sólidos, líquidos e orgânicos, cuja quantidade aumenta proporcionalmente ao crescimento da produção e do consumo mundial de café (Murthy; Naidu, 2012; Besteti *et al.*, 2025).

A natureza e o volume desses resíduos variam de acordo com a etapa produtiva e com a tecnologia empregada no processamento. De modo geral, materiais como cascas, polpa, pergaminho, mucilagem, borra de café, águas residuárias e resíduos de poda representam os principais subprodutos gerados ao longo da cadeia cafeeira.

A geração de resíduos ao longo da cadeia produtiva do café está diretamente relacionada às transformações físicas e biológicas que ocorrem durante o processamento dos frutos. Em muitos casos, esses materiais ainda são tratados como rejeitos, apesar de apresentarem elevado potencial para reaproveitamento agrícola, energético e industrial. A identificação das principais fontes geradoras de resíduos constitui etapa fundamental para o planejamento de estratégias de manejo sustentável, permitindo reduzir impactos ambientais e agregar valor aos subprodutos da atividade cafeeira. Nesse contexto,

compreender a origem, a composição e a quantidade dos resíduos produzidos em cada fase da cadeia produtiva torna-se essencial para subsidiar práticas de economia circular e fortalecer a sustentabilidade dos sistemas de produção (Faria *et al.*, 2023; Besteti *et al.*, 2025; Mendonça *et al.*, 2026). A Figura 2 apresenta uma visão integrada dos principais resíduos gerados desde a fase de cultivo até o beneficiamento e o consumo do café.

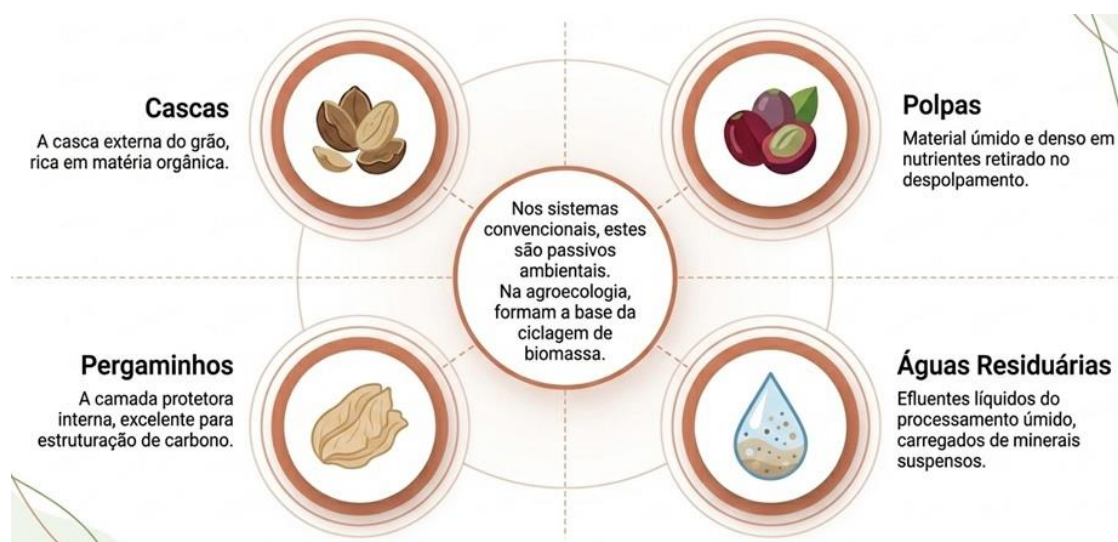


Figura 2. Principais resíduos sólidos, líquidos e orgânicos gerados nas diferentes etapas da cadeia produtiva do café. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Nesse contexto, no Brasil, devido à elevada escala de produção cafeeira, a geração de resíduos tornou-se um importante desafio ambiental e econômico. Grande parte desses resíduos possui elevada carga orgânica e, quando manejada inadequadamente, pode provocar impactos ambientais significativos, como contaminação do solo e dos recursos hídricos, emissão de gases de efeito estufa, proliferação de microrganismos e desperdício de biomassa com potencial de reaproveitamento (Maciel *et al.*, 2020; Besteti *et al.*, 2025).

Além disso, a intensificação da cafeicultura e a crescente demanda por produtividade elevam o consumo de insumos, embalagens e fertilizantes, ampliando a complexidade dos resíduos gerados ao longo da cadeia produtiva. Dessa forma, torna-se fundamental compreender as principais fontes geradoras

desses materiais para subsidiar estratégias de manejo sustentável e valorização dos subprodutos da atividade cafeeira (Mussatto *et al.*, 2011; Besteti *et al.*, 2025).

Sob essa perspectiva, os resíduos provenientes da cadeia cafeeira apresentam elevado potencial para aplicação em práticas sustentáveis, como compostagem, produção de biofertilizantes, geração de energia, alimentação animal e utilização em sistemas agroecológicos. A correta identificação, segregação e destinação desses materiais permite transformar passivos ambientais em recursos produtivos, agregando valor à cadeia do café e reduzindo impactos ambientais. As principais possibilidades de aproveitamento desses resíduos são apresentadas na Figura 3, evidenciando sua contribuição para a economia circular e para o fortalecimento da sustentabilidade na cafeicultura (Silva; Souza, 2021; Zampieri *et al.*, 2025).

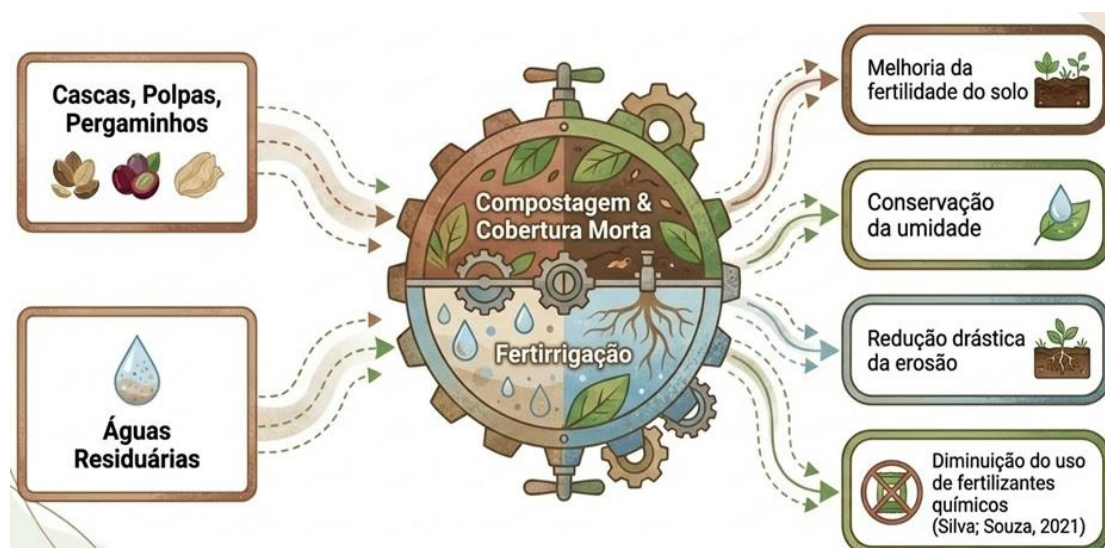


Figura 3. Resíduos da cadeia produtiva do café e suas possibilidades de aproveitamento agrícola, energético e ambiental. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A Figura 3 ilustra o fluxo de valorização da biomassa residual na cadeia produtiva do café, evidenciando que o manejo integrado de subprodutos, como polpa, casca, pergaminho e borra, vai além da redução dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado. Ao reintegrar esses materiais ao sistema produtivo por meio de rotas biotecnológicas, energéticas e agronômicas, promove-se o fechamento dos ciclos de nutrientes e carbono, fortalecendo os

princípios da economia circular. Essa abordagem contribui simultaneamente para a redução de passivos ambientais, para a otimização do uso dos recursos disponíveis e para a geração de novas oportunidades econômicas na propriedade rural. Nesse contexto, torna-se fundamental compreender a origem e as características dos diferentes resíduos gerados ao longo da cadeia cafeeira, tema abordado na seção seguinte (Faria *et al.*, 2023; Besteti *et al.*, 2025; Mendonça *et al.*, 2026).

2.1. Resíduos gerados na produção do café

A geração de resíduos na cafeicultura ocorre em praticamente todas as etapas produtivas, atingindo seu ápice na fase de pós-colheita, onde o processamento dos frutos descarta volumes expressivos de materiais sólidos e líquidos, como casca, polpa, mucilagem, pergaminho e águas residuárias (ARC) provenientes da lavagem e despolpa (Pandey *et al.*, 2000; Silva *et al.*, 2024) (Figura 4).



Figura 4. Fluxograma do processamento do café e dos resíduos gerados em cada etapa. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A Figura 4 evidencia que a natureza e a quantidade dos resíduos gerados variam conforme a etapa do processamento adotada. Entre os principais fatores

que influenciam essa dinâmica destacam-se os métodos de processamento do café, como *natural*, *semi-dry*, *washed* e fermentação induzida por *Saccharomyces cerevisiae*, os quais diferem essencialmente na forma de remoção da mucilagem e no rigor do controle fermentativo. Consequentemente, cada técnica aplicada não apenas define o manejo dos resíduos gerados, mas também confere perfis sensoriais distintos à bebida, permitindo realçar atributos específicos como doçura, acidez e complexidade aromática (Schwan; Vilela, 2022).

Nesse cenário, o processamento via úmida, essencial para a obtenção de cafés especiais, resulta em uma elevada geração de águas residuárias ricas em matéria orgânica, açúcares e compostos fenólicos. Caso esse efluente seja descartado sem o devido tratamento, pode desencadear processos de eutrofização e a redução drástica do oxigênio dissolvido em corpos hídricos, comprometendo a biodiversidade aquática e a qualidade dos recursos naturais (Janissen; Huynh, 2018; Souza; Simão, 2024).

No beneficiamento por via seca, destacam-se os resíduos lignocelulósicos, como cascas e pergaminhos, que representam parcela significativa da biomassa gerada. Esses materiais apresentam elevado potencial de reaproveitamento em práticas como compostagem, cobertura morta, produção de substratos e geração de energia térmica, contribuindo para a redução da dependência de insumos externos e para o fortalecimento da economia circular (Murthy; Naidu, 2012; Silverio *et al.*, 2025) (Figura 5).

A Figura 5 demonstra que resíduos tradicionalmente considerados passivos ambientais podem ser reinseridos no sistema produtivo como recursos de valor econômico e ambiental. No caso da cafeicultura, a palha do café pode ser direcionada para diferentes finalidades, como cobertura do solo, compostagem, produção de biofertilizantes, geração de energia e fabricação de substratos agrícolas. Essa lógica promove o aproveitamento integral da biomassa, reduz a geração de resíduos e fortalece os princípios da economia circular, contribuindo para maior eficiência no uso dos recursos e para a sustentabilidade da atividade cafeeira.

Além dos resíduos orgânicos, a cadeia cafeeira gera resíduos sólidos provenientes das atividades de campo, como embalagens de fertilizantes,

defensivos agrícolas e sacarias. O descarte inadequado desses materiais pode ocasionar a contaminação química do solo e da água, além de riscos à saúde pública. Tal cenário reforça a necessidade de um gerenciamento ambiental rigoroso e da adoção de práticas de logística reversa, em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010).



Figura 5. Reaproveitamento da palha de café e agregação de valor na economia circular. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Outro aspecto relevante refere-se aos resíduos gerados durante o consumo da bebida, especialmente a borra de café, frequentemente descartada como lixo comum. Estudos recentes demonstram que esse resíduo apresenta elevado potencial para produção de compostos orgânicos, biocombustíveis, cosméticos, biomateriais e até biochar, ampliando as possibilidades de reaproveitamento sustentável ao longo da cadeia cafeeira (Campos-Vega *et al.*, 2015).

Nesse contexto, a elevada produção de resíduos evidencia a necessidade premente de estratégias sustentáveis de manejo. Segundo Anagnostopoulos *et al.* (2017), estima-se que a produção de uma tonelada de café possa gerar mais de 600 kg de resíduos orgânicos. Complementando essa discussão, Tsigkou *et al.* (2025) destacam que mais de 90% da biomassa dos frutos maduros transforma-se em resíduos sólidos ao longo do processamento, incluindo polpa,

mucilagem, pergaminho e cascas, variando conforme o método de beneficiamento.

Nesse contexto, a quantidade de resíduos gerada ao longo da cadeia produtiva evidencia a necessidade premente de estratégias sustentáveis de manejo, uma vez que representa simultaneamente um desafio ambiental e uma oportunidade para a promoção da sustentabilidade no setor cafeeiro. Embora parte significativa dessa biomassa ainda seja tratada como rejeito, diversos estudos demonstram que esses materiais possuem elevado potencial para reaproveitamento agrícola, energético e industrial. Sob a perspectiva da economia circular, resíduos como polpa, casca, mucilagem e pergaminho podem ser convertidos em insumos capazes de retornar ao sistema produtivo, reduzindo a dependência de recursos externos e minimizando impactos ambientais. Dessa forma, a quantificação da biomassa residual torna-se fundamental para compreender a dimensão do problema e identificar oportunidades de valorização desses subprodutos (Faria *et al.*, 2023; Besteti *et al.*, 2025; Mendonça *et al.*, 2026). A Figura 6 apresenta uma síntese da geração de resíduos e das possibilidades de aproveitamento da biomassa residual ao longo da cadeia produtiva do café.



Figura 6. Produção de resíduos e potenciais de aproveitamento da biomassa residual na cadeia do café. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (ChatGPT).

Os dados apresentados na Figura 6 evidenciam a magnitude da biomassa residual gerada pela cafeicultura. No Brasil, o processamento por via seca pode gerar aproximadamente 1 kg de casca para cada 1 kg de grão beneficiado. Além disso, estima-se a geração anual de cerca de três milhões de toneladas de polpa, 816 mil toneladas de mucilagem e 421 mil toneladas de pergaminho na cadeia cafeeira nacional (Tsigkou *et al.*, 2025). Esses números reforçam o enorme potencial de valorização desses materiais em sistemas produtivos sustentáveis e regenerativos.

Dessa forma, os resíduos gerados durante a cadeia produtiva do café necessitam de destinação e tratamento adequados, uma vez que o manejo incorreto pode causar impactos ambientais severos e, em alguns casos, irreversíveis. Além disso, o descarte inadequado representa desperdício de matérias-primas valiosas que poderiam ser reutilizadas na produção de fertilizantes orgânicos, bioenergia, compostagem e outros insumos agrícolas sustentáveis, contribuindo para maior eficiência ambiental, econômica e social da cafeicultura (Figura 7).



Figura 7. Destinação atual e potencial de valorização dos resíduos gerados no processamento do café. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

As diferentes possibilidades de aproveitamento apresentadas na Figura 7 refletem distintas abordagens de gestão dos resíduos. Enquanto algumas permanecem associadas a fluxos lineares de produção e descarte, outras incorporam princípios da economia circular, promovendo a reinserção dos materiais nos sistemas produtivos.

Os modelos de gestão de resíduos refletem diferentes formas de interação entre os sistemas produtivos e o meio ambiente. No modelo linear, predominante nas cadeias produtivas convencionais, os recursos naturais são extraídos, transformados, consumidos e descartados, gerando elevado volume de resíduos e impactos ambientais. Em contraste, o modelo de regeneração circular busca reinserir os resíduos nos processos produtivos, promovendo o reaproveitamento, a reciclagem e a valorização de subprodutos, reduzindo desperdícios e estimulando a sustentabilidade. Nesse contexto, a Figura 8 apresenta uma comparação entre os modelos de extração linear e regeneração circular, evidenciando suas diferenças quanto ao fluxo de materiais, uso de recursos e destinação dos resíduos.

Dimensão	Modelo Linear (Convencional)	Modelo Circular (Regenerativo)
Fluxo de Insumos	 Importados, baseados em petróleo e sais solúveis.	 Fechado: Biofertilizantes, adubação verde e compostagem local.
Destinação de Resíduos	 Lixo ou passivo ambiental (ex: contaminação de lençóis freáticos).	 Ativo de alto valor (ex: palha rica em Nitrogênio e Potássio retorna ao solo).
Saúde do Solo	 Exaurido , compactado, baixíssima CTC, focado em nutrição da planta.	 Máquina viva, alta CTC , microvida abundante, retém água e húmus.
Perfil Econômico	 Refém de commodities de baixo valor e flutuações de preços globais.	 Resiliente , custos decrescentes a longo prazo, acesso a prêmios (Fair Trade/Especiais).

Figura 8. Comparação entre os modelos de economia linear e regeneração circular na gestão de resíduos. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A transição de sistemas produtivos baseados na lógica linear de extração, consumo e descarte para modelos fundamentados na circularidade representa

uma mudança estratégica na forma de produzir e consumir, especialmente em atividades agroindustriais como a cafeicultura. A adoção de práticas circulares permite transformar resíduos orgânicos em insumos úteis, como fertilizantes, compostos orgânicos, bioenergia e novos produtos de valor agregado, contribuindo para a redução da pressão sobre os recursos naturais e para o fortalecimento da economia sustentável. Além dos benefícios ambientais, esse modelo favorece a eficiência produtiva, a geração de renda e a construção de sistemas mais resilientes e alinhados aos princípios da sustentabilidade e da agroecologia (Peron *et al.*, 2026).

Conforme ilustrado na Figura 8, a economia circular busca manter os materiais em ciclos produtivos, reduzindo perdas e impactos ambientais, em contraste com o modelo linear, caracterizado pelo elevado consumo de recursos naturais e pela geração contínua de resíduos. Na cadeia produtiva do café, essa abordagem possibilita o reaproveitamento de cascas, mucilagem, polpa e borra para a produção de fertilizantes, compostos orgânicos, bioenergia e outros produtos de valor agregado, promovendo maior eficiência no uso dos recursos e fortalecendo a sustentabilidade econômica e ambiental do sistema (Souza, 2006; Souza, 2026).

Apesar desse elevado potencial de reaproveitamento, uma parcela significativa dos resíduos gerados na cadeia cafeeira ainda recebe destinação inadequada, favorecendo perdas de recursos e impactos ambientais. Nesse contexto, torna-se necessário compreender os principais efeitos associados ao manejo inadequado desses resíduos, tema abordado na seção seguinte.

2.2. Impactos ambientais dos resíduos gerados na produção do café

A expansão da cafeicultura e o aumento da demanda mundial pela bebida intensificaram a geração de resíduos e os impactos ambientais associados à cadeia produtiva do café. Desde a implantação dos cafezais até as etapas de colheita, beneficiamento, industrialização e consumo, diferentes formas de degradação ambiental podem ser observadas, evidenciando a necessidade de adoção de sistemas produtivos mais sustentáveis e alinhados aos princípios da conservação ambiental e da agroecologia.

Entre os principais problemas ambientais relacionados à cafeicultura, destacam-se a geração excessiva de resíduos sólidos, o descarte inadequado de embalagens plásticas, a contaminação do solo e da água, a emissão de gases de efeito estufa e o elevado consumo de recursos naturais, especialmente água e combustíveis fósseis (Maciel *et al.*, 2020).

Os impactos ambientais da cafeicultura não estão restritos às etapas de beneficiamento e processamento dos frutos. Desde a implantação da lavoura já ocorre a geração de resíduos associados à produção de mudas, ao uso de insumos agrícolas e aos materiais empregados nas atividades de manejo. Entre esses resíduos destacam-se embalagens plásticas, tubetes, sacolas para mudas, recipientes de fertilizantes e defensivos agrícolas, que, quando não recebem destinação adequada, podem permanecer no ambiente por longos períodos. A Figura 9 exemplifica uma das primeiras fontes de geração de resíduos na cadeia produtiva do café, evidenciando o uso de recipientes plásticos durante a fase de formação das mudas.



Figura 9. Uso de recipientes plásticos na produção de mudas de café e potencial geração de resíduos durante a implantação dos cafezais. Fonte: Acervo Maurício Novaes, 2023; Rehagro, 2025.

Segundo Lopes *et al.* (2023), a cafeicultura ocupa posição de destaque entre as atividades agrícolas geradoras de resíduos plásticos, principalmente devido ao uso intensivo de embalagens de fertilizantes, defensivos agrícolas,

sacarias, recipientes de armazenamento, tubetes e sacolas utilizadas na produção de mudas. Grande parte desses materiais, quando descartada inadequadamente, pode permanecer no ambiente por longos períodos, contribuindo para a poluição do solo, dos corpos hídricos e da biota terrestre.

Ao analisar cronologicamente a cadeia produtiva do café, observa-se que os impactos e externalidades ambientais podem ser identificados já na fase de implantação do parque cafeeiro. Em períodos passados, práticas como queimadas eram frequentemente utilizadas para limpeza das áreas destinadas ao cultivo, especialmente em locais com elevada presença de matéria orgânica. Essa prática contribui para a emissão de dióxido de carbono (CO₂), óxidos nitrosos e hidrocarbonetos, substâncias associadas ao agravamento do efeito estufa, à poluição atmosférica e a problemas respiratórios na população (Lopes *et al.*, 2023).

Além disso, durante a implantação das lavouras, resíduos como tubetes, sacolas plásticas e embalagens de mudas frequentemente têm destinação inadequada, sendo abandonados no solo ou descartados incorretamente. Esses materiais podem provocar impactos ambientais persistentes devido à lenta degradação do plástico no ambiente, além de favorecer a formação de microplásticos nos ecossistemas agrícolas (Geyer; Jambeck; Law, 2017).

Após o estabelecimento da lavoura, as etapas de manejo do cafeeiro também representam importante fonte geradora de resíduos e potenciais impactos ambientais. Entre os principais problemas destacam-se o descarte incorreto de embalagens de agrotóxicos, o uso excessivo de fertilizantes químicos, a aplicação desordenada de defensivos agrícolas e o manejo inadequado das caldas pulverizadas. Essas práticas podem causar contaminação do solo, intoxicação de organismos não alvo, redução da biodiversidade e poluição de recursos hídricos superficiais e subterrâneos (Pignati *et al.*, 2017).

Após o estabelecimento da lavoura, as etapas de manejo do cafeeiro também representam importante fonte geradora de resíduos e potenciais impactos ambientais. Entre os principais problemas destacam-se o descarte incorreto de embalagens de agrotóxicos, o uso excessivo de fertilizantes

químicos, a aplicação desordenada de defensivos agrícolas e o manejo inadequado das caldas pulverizadas. Essas práticas podem causar contaminação do solo, intoxicação de organismos não alvos, redução da biodiversidade e poluição de recursos hídricos superficiais e subterrâneos (*ibidem*).

A intensificação dos sistemas produtivos convencionais frequentemente está associada à simplificação da paisagem agrícola, caracterizada pela redução da diversidade vegetal e pela eliminação de elementos naturais presentes no entorno das lavouras. Essa transformação compromete importantes serviços ecossistêmicos, como a polinização, a ciclagem de nutrientes e o controle biológico natural de pragas. Como consequência, observa-se maior vulnerabilidade dos agroecossistemas a surtos populacionais de organismos fitófagos, favorecendo o aumento do uso de defensivos agrícolas e ampliando os riscos de contaminação ambiental.

Nesse contexto, a manutenção de áreas vegetadas e de componentes arbóreos desempenha papel fundamental na conservação da biodiversidade funcional e na estabilidade ecológica dos sistemas cafeeiros. Em contrapartida, a remoção da vegetação arbórea elimina abrigo, alimento e locais de reprodução para a fauna benéfica, rompendo importantes relações ecológicas e reduzindo a presença de inimigos naturais das pragas. Essa simplificação biológica cria uma dependência crescente de insumos químicos para manter a produtividade agrícola, conforme ilustrado na Figura 10.

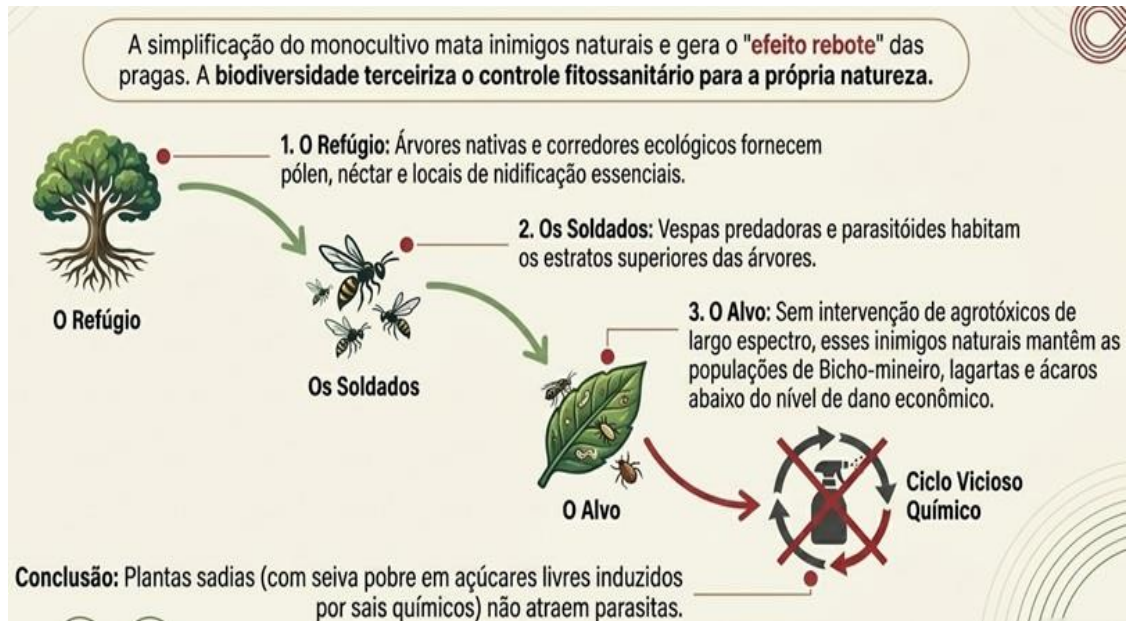


Figura 10. Papel da vegetação arbórea na manutenção do controle biológico e da biodiversidade funcional em cafezais. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A Figura 10 evidencia que a manutenção de componentes arbóreos na paisagem agrícola favorece a conservação da biodiversidade funcional e fortalece mecanismos naturais de regulação ecológica, como o controle biológico de pragas. Dessa forma, sistemas produtivos mais diversificados tendem a reduzir a dependência de insumos químicos externos, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e para o equilíbrio dos agroecossistemas cafeeiros.

Outro aspecto relevante refere-se à mecanização agrícola utilizada durante a colheita e o beneficiamento do café. Máquinas movidas a combustíveis fósseis contribuem para a emissão de gases de efeito estufa, especialmente dióxido de carbono (CO_2), intensificando os impactos das mudanças climáticas globais. Além disso, o processamento via úmida demanda elevado consumo hídrico. Segundo Campos *et al.* (2021), podem ser utilizados entre 3 e 5 litros de água para o processamento de 1 litro de café, gerando águas residuárias ricas em matéria orgânica, nutrientes e compostos fenólicos.

Quando essas águas residuárias são descartadas sem tratamento adequado, podem provocar redução do oxigênio dissolvido em corpos hídricos, eutrofização, mortandade de organismos aquáticos e contaminação ambiental.

Esse cenário reforça a importância da adoção de sistemas de tratamento, reutilização da água e manejo sustentável dos resíduos líquidos gerados na pós-colheita do café (Janissen; Huynh, 2018).

Além dos impactos ambientais diretos, o manejo inadequado dos resíduos da cafeicultura também gera consequências sociais e econômicas, como aumento dos custos produtivos, desperdício de biomassa potencialmente aproveitável, riscos à saúde humana e redução da qualidade ambiental das comunidades rurais. Em contrapartida, práticas sustentáveis de manejo e valorização desses resíduos podem contribuir significativamente para a redução dos impactos ambientais, a geração de novos produtos e fontes de renda, o aumento da eficiência no uso dos recursos naturais e a construção de sistemas produtivos mais resilientes e sustentáveis, substituindo a lógica linear de descarte pelo paradigma da economia circular (Maciel *et al.*, 2020; Tsigkou *et al.*, 2025).

A crescente preocupação com os impactos ambientais decorrentes da geração de resíduos tem impulsionado a busca por modelos produtivos mais eficientes e sustentáveis. Nesse contexto, a economia circular emerge como uma alternativa capaz de substituir a lógica convencional de extração, consumo e descarte por sistemas que priorizam o reaproveitamento de materiais, a reciclagem de recursos e a regeneração dos processos produtivos. Na cafeicultura, essa abordagem permite transformar resíduos anteriormente considerados passivos ambientais em insumos de valor econômico, ambiental e social, contribuindo para a sustentabilidade da cadeia produtiva. A Figura 11 apresenta uma representação conceitual dessa transição.

A Figura 11 evidencia que a adoção dos princípios da economia circular possibilita reduzir a geração de resíduos e ampliar a eficiência no uso dos recursos naturais ao longo da cadeia produtiva do café. Por meio do reaproveitamento de subprodutos como cascas, polpa, mucilagem, pergaminho e borra de café, torna-se possível promover a ciclagem de nutrientes, a geração de energia, a produção de fertilizantes orgânicos e a agregação de valor aos resíduos. Essa mudança de paradigma contribui não apenas para a mitigação dos impactos ambientais, mas também para o fortalecimento da viabilidade econômica e da resiliência dos sistemas produtivos.

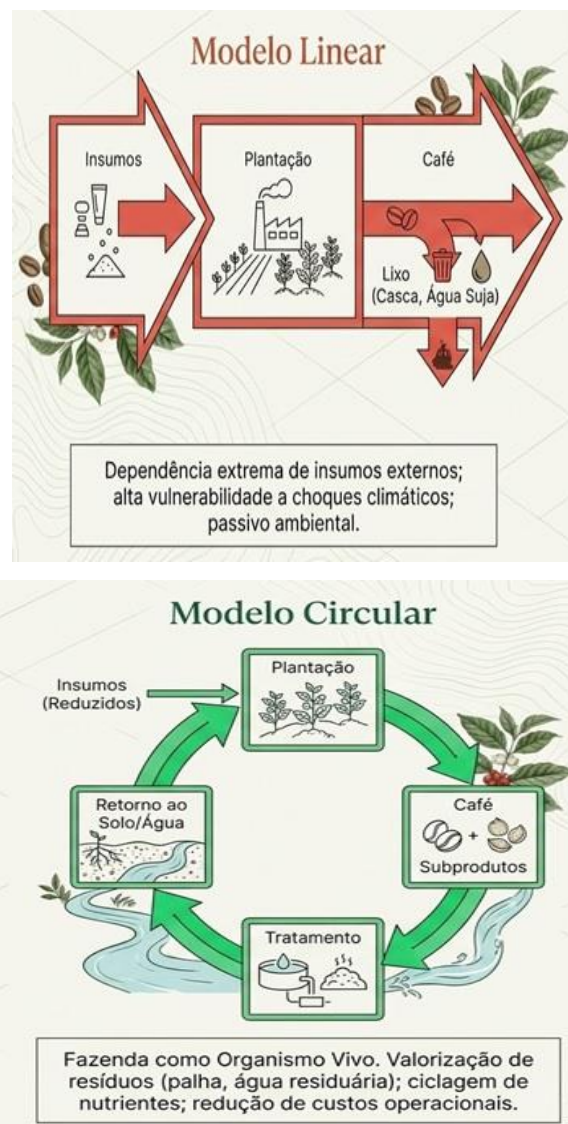


Figura 11. Transição da economia linear para a economia circular na gestão de resíduos da cadeia produtiva do café. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Dessa forma, compreender os impactos ambientais gerados ao longo da cadeia produtiva do café é fundamental para o desenvolvimento de estratégias que promovam o correto gerenciamento dos resíduos, a conservação dos recursos naturais e o fortalecimento de uma cafeicultura ambientalmente responsável, socialmente justa e economicamente viável.

Fundamentalmente, a transição para modelos produtivos baseados na agroecologia e na economia circular representa um dos principais caminhos para a superação dos gargalos ambientais da cafeicultura moderna. Ao valorizar os

serviços ecossistêmicos, como o controle biológico proporcionado pela biodiversidade funcional, e ao reinserir os subprodutos do processamento no ciclo produtivo, o cafeicultor deixa de ser apenas um gestor de insumos para assumir o papel de gestor de processos ecológicos. Essa mudança de perspectiva contribui para a proteção dos recursos naturais, para a saúde das comunidades rurais e para a resiliência econômica das propriedades frente às instabilidades climáticas e às crescentes exigências do mercado global por produtos de origem ética e sustentável (Silva *et al.*, 2024; Souza; Simão, 2024). Nesse contexto, torna-se essencial compreender as principais estratégias de manejo sustentável capazes de transformar os resíduos da cafeicultura em recursos de valor econômico, ambiental e social.

3. Manejo sustentável dos resíduos gerados na cadeia do café

O manejo sustentável dos resíduos gerados na cadeia produtiva do café constitui uma estratégia fundamental para a redução dos impactos e externalidades ambientais associados à atividade cafeeira. Além de minimizar problemas relacionados à poluição do solo, da água e do ar, o reaproveitamento desses resíduos contribui para o fortalecimento da economia circular, promovendo maior eficiência no uso dos recursos naturais e agregando valor aos subprodutos gerados durante a produção e o beneficiamento do café.

A adoção de práticas sustentáveis na cafeicultura pressupõe uma visão sistêmica da propriedade rural, na qual os resíduos deixam de ser considerados passivos ambientais e passam a integrar os fluxos de matéria e energia do agroecossistema. Nesse modelo, os subprodutos gerados durante a produção e o beneficiamento do café podem ser reaproveitados em diferentes processos, promovendo a ciclagem de nutrientes, a melhoria da fertilidade do solo, a conservação dos recursos hídricos e a redução da dependência de insumos externos. Dessa forma, o manejo sustentável dos resíduos contribui simultaneamente para a sustentabilidade ambiental, a eficiência produtiva e a viabilidade econômica da atividade cafeeira (Souza, 2026). A Figura 12 apresenta uma visão integrada dessas estratégias e de suas interações no contexto da propriedade rural.



Figura 12. Fluxo integrado de reaproveitamento de resíduos e práticas sustentáveis na cafeicultura. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Nesse contexto, práticas sustentáveis voltadas ao reaproveitamento de resíduos orgânicos, líquidos e sólidos vêm ganhando destaque na cafeicultura moderna, especialmente em sistemas produtivos agroecológicos e conservacionistas. Entre as principais alternativas utilizadas destacam-se a compostagem, o uso de cobertura morta, a produção de biofertilizantes, a reutilização da água residuária, a geração de energia a partir da biomassa, a implantação de sistemas agroflorestais (SAFs) e a aplicação de resíduos orgânicos para a melhoria da qualidade física, química e biológica do solo (Murthy; Naidu, 2012; Silva; Souza, 2021). Como evidenciado na Figura 12, a integração dessas estratégias no cotidiano da propriedade configura um ciclo de aproveitamento que otimiza o fluxo de nutrientes e energia.

Além dos benefícios ambientais, o manejo adequado dos resíduos pode reduzir custos produtivos, diminuir a dependência de fertilizantes químicos e fortalecer a sustentabilidade econômica das propriedades cafeeiras. Dessa forma, o aproveitamento dos resíduos gerados ao longo da cadeia do café representa uma importante ferramenta para promover sistemas agrícolas mais resilientes, sustentáveis e alinhados às exigências ambientais contemporâneas.

Entre os materiais com maior potencial de reaproveitamento destacam-se a casca e o pergaminho do café, resíduos lignocelulósicos amplamente disponíveis e com diversas aplicações agronômicas e energéticas.

3.1. Reaproveitamento da casca e pergaminho

Como abordado anteriormente, grande parte dos resíduos gerados na cadeia produtiva do café é proveniente das etapas de pós-colheita, destacando-se principalmente a casca, a polpa e o pergaminho. Esses materiais representam parcela significativa da biomassa residual produzida durante o beneficiamento dos frutos, tornando indispensável a adoção de estratégias adequadas de destinação e reaproveitamento.

A utilização de subprodutos da cafeicultura na agricultura apresenta-se como uma estratégia eficaz para a manutenção da matéria orgânica e para a melhoria da qualidade do solo. O aporte de casca e polpa de café favorece a reestruturação física e o equilíbrio químico do sistema. De acordo com Carvalho *et al.* (2009) e ABD Manan; Mohd Rozali; Azmi (2024), a utilização de polpa estabilizada incrementa o pH e a capacidade de troca catiônica (CTC), além de fortalecer a agregação do solo. Verificou-se que essa prática eleva substancialmente a disponibilidade de macronutrientes (N, P, S e Mg) e micronutrientes (Fe), bem como os estoques de carbono, consolidando os resíduos cafeeiros como importantes condicionadores de solo.

Entretanto, a viabilidade dessas práticas deve ser analisada não apenas sob a perspectiva agronômica, mas também em função da realidade socioeconômica das propriedades rurais. Nesse contexto, a Figura 13 sintetiza os resultados obtidos em estudos conduzidos pela Universidade Federal de Lavras (UFLA), no município de Santo Antônio do Amparo, MG, estabelecendo um comparativo entre a Agricultura Empresarial, representada pela Fazenda Nossa Senhora da Guia (NKG), e a Agricultura Familiar, vinculada ao Projeto PX. A matriz relaciona os diferentes resíduos e condicionadores de solo aos seus impactos físicos, químicos e biológicos, bem como à sua viabilidade de adoção em distintos modelos produtivos (Carvalho *et al.*, 2009).

Matriz de Diagnóstico		
Condicionador	Impacto no Solo (CTC e pH)	Aderência e Escala
Casca de Café (Palha)	Melhora estrutural contínua.	Uso preferencial orgânico ou energia para secadores.
Biochar	Aumentou a CTC a pH 7.0 em 12% .	Maior impacto na produtividade familiar.
Composto Orgânico	Aumentou a CTC em 17% (em relação ao controle).	Alta eficácia biológica.
COMBI (Composto + Biochar)	Aumento significativo de saturação de bases (V) e CTC.	Ideal para agricultura empresarial de larga escala.

 **Insight:** A matéria orgânica circular não apenas nutre, mas reestrutura biologicamente o solo.

Figura 13. Valoração agrônômica de resíduos cafeeiros como condicionadores de solo em diferentes modelos produtivos. Fonte: Adaptado de estudos da UFLA em Santo Antônio do Amparo, MG, por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA NotebookLM).

A matriz correlaciona os diferentes condicionadores de solo aos seus respectivos impactos físicos, químicos e biológicos, avaliando não apenas a melhoria de fertilidade, mas também a aderência e escala de cada prática. Enquanto no modelo empresarial da NKG o foco reside na mecanização e no ganho de escala para grandes extensões, no modelo familiar do Projeto PX a valoração enfatiza a autonomia do produtor e o uso intensivo de recursos locais. Essa análise comparativa é fundamental para demonstrar que, embora as respostas do solo aos macronutrientes (N, P, S, Mg) e micronutrientes (Fe) sejam consistentes, a estratégia de aplicação e o gerenciamento dos resíduos devem ser personalizados para garantir a sustentabilidade econômica em ambas as escalas (Carvalho *et al.*, 2009).

Além do enriquecimento nutricional, a utilização de cascas e pergaminhos como cobertura morta contribui para a conservação da umidade do solo, redução da erosão, controle da temperatura e diminuição da emergência de plantas espontâneas. Tais benefícios favorecem a sustentabilidade dos sistemas produtivos e reduzem a necessidade de utilização intensiva de insumos químicos externos (Silva; Souza, 2021).

Os benefícios da compostagem vão além da simples redução do volume de resíduos destinados ao descarte. Durante o processo de decomposição, ocorre a estabilização da matéria orgânica e a concentração de nutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal, resultando em um insumo capaz de melhorar a fertilidade e a qualidade do solo. Estudos recentes demonstram que a combinação de compostos orgânicos com materiais carbonizados, como o biochar, potencializa ainda mais esses efeitos, favorecendo a retenção de nutrientes e aumentando a eficiência dos processos biológicos e químicos do solo (Lehmann *et al.*, 2011; Mussatto *et al.*, 2011; Lehmann; Joseph, 2015). A Figura 14 apresenta resultados experimentais que evidenciam o impacto desses condicionadores sobre atributos relacionados à fertilidade edáfica.

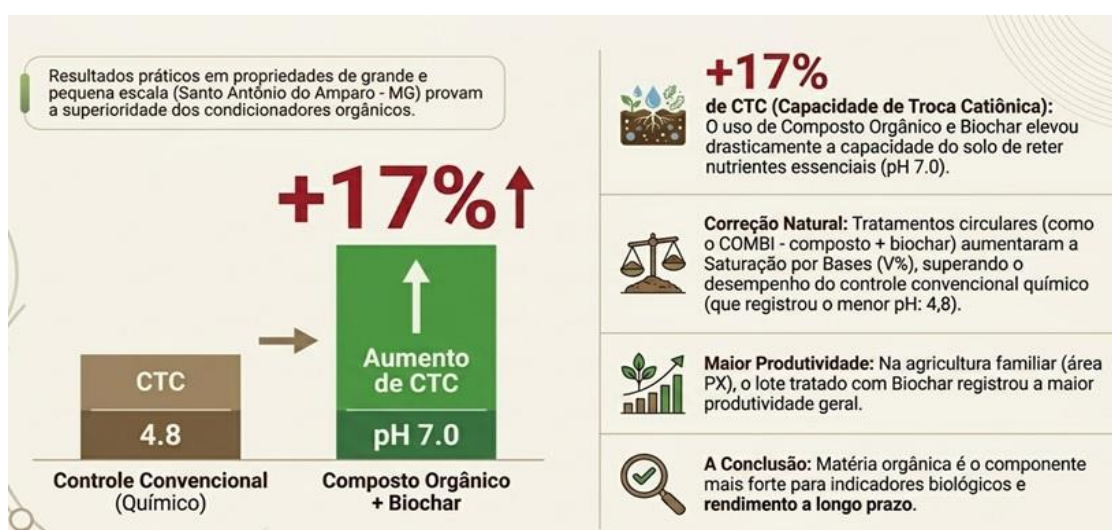


Figura 14. Efeitos da aplicação de compostos orgânicos e biochar sobre a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo. Fonte: Adaptado de estudos da UFLA em Santo Antônio do Amparo, MG, por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA NotebookLM).

Como demonstrado na Figura 14, dados experimentais reforçam a eficiência do aproveitamento agrônomo dos resíduos cafeeiros, evidenciando que a associação entre compostos orgânicos e biochar promove incrementos significativos na capacidade de troca catiônica (CTC) do solo quando comparada ao uso exclusivo de fertilizantes convencionais. Esse resultado indica maior potencial de retenção e disponibilização de nutrientes às plantas, além de

contribuir para a melhoria da qualidade química do solo e para a sustentabilidade dos sistemas produtivos (Zhao *et al.*, 2025).

Além da utilização agrícola, a casca e outros resíduos provenientes do processamento do café também apresentam elevado potencial para geração de energia renovável. Estudos recentes indicam que esses resíduos podem ser utilizados como biomassa para produção de *pellets*, briquetes e biochar destinados à geração de energia térmica. Essa alternativa contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis e amplia o aproveitamento energético de subprodutos agrícolas, fortalecendo a sustentabilidade da cadeia produtiva do café (Murthy; Naidu, 2012; Medina *et al.*, 2025) (Figura 15).

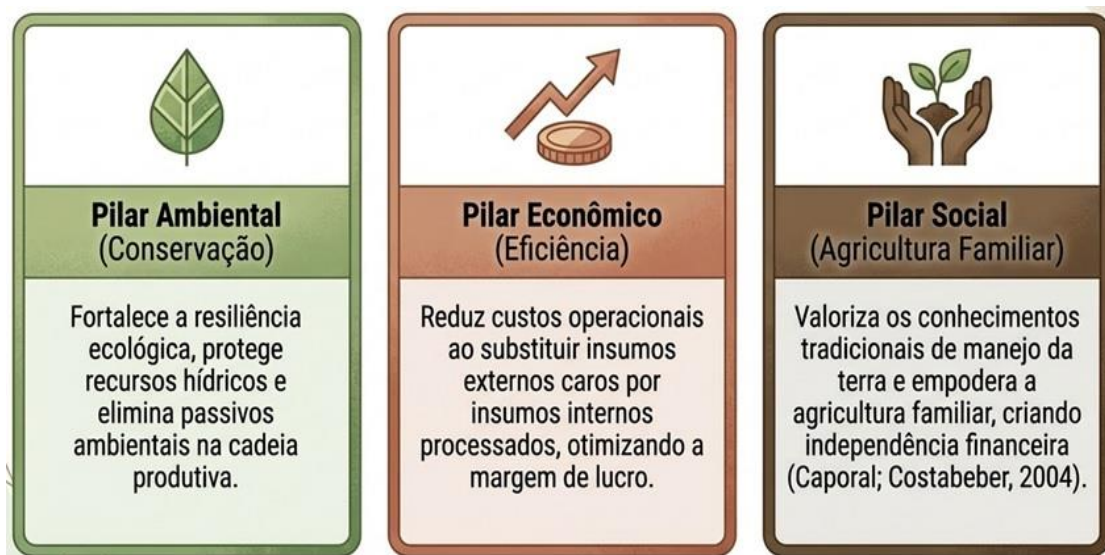


Figura 15. O impacto sistêmico da valorização de resíduos: integração dos benefícios econômicos, ambientais e sociais na cafeicultura moderna. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Como ilustrado na Figura 15, os benefícios decorrentes da valorização dos resíduos cafeeiros extrapolam os limites da produção agrícola e alcançam diferentes setores produtivos. Outro aspecto relevante refere-se ao potencial biotecnológico desses resíduos. Pesquisas recentes demonstram que cascas, polpas e pergaminhos podem ser utilizados na produção de enzimas, substratos para cultivo de microrganismos, extração de compostos antioxidantes e fabricação de materiais biodegradáveis, ampliando as possibilidades de valorização econômica e ambiental dos resíduos cafeeiros (Pandey *et al.*, 2000; Gomes *et al.*, 2021; 2022). Essa visão multifacetada evidencia que o manejo de

resíduos transcende a operação agrícola, consolidando-se como um fator de impacto sistêmico que harmoniza ganhos produtivos, preservação ecossistêmica e desenvolvimento humano.

Dessa forma, torna-se evidente a importância do reaproveitamento sustentável da casca e do pergaminho na cadeia produtiva do café. Além de contribuir para a redução dos impactos ambientais causados pelo descarte inadequado desses resíduos, sua reutilização promove benefícios agronômicos, econômicos e energéticos, fortalecendo práticas sustentáveis e incentivando modelos de produção agrícolas mais eficientes e ambientalmente responsáveis.

Entre os diferentes resíduos gerados na cafeicultura, destacam-se também os efluentes líquidos produzidos durante o processamento dos frutos. Em razão de seu elevado potencial poluidor e do grande volume gerado, a água residuária demanda estratégias específicas de manejo e reaproveitamento, conforme discutido na seção seguinte.

3.2. Reaproveitamento da água residuária gerada no processamento via úmida

Como descrito anteriormente, o processamento dos frutos do café pode ocorrer por via seca ou via úmida. No processamento via úmida, amplamente utilizado na produção de cafés especiais para garantir maior uniformidade e qualidade sensorial, ocorre um elevado consumo de água durante as etapas de lavagem, despolpa, desmucilagem e transporte hidráulico dos frutos. Em função dessa intensa demanda hídrica, gera-se um grande volume de efluentes líquidos, caracterizados por uma carga poluidora complexa, composta por matéria orgânica em suspensão, açúcares, compostos fenólicos e uma variedade de nutrientes minerais (Matos, 2008; Soares *et al.*, 2008; Matos *et al.*, 2017).

A complexidade química dessa água residuária reside no fato de que o processo de fermentação e desmucilagem liberam substâncias recalcitrantes e reduz drasticamente o pH do efluente. Se descartada sem o devido tratamento ou monitoramento, essa mistura pode desencadear sérios danos ambientais, como a degradação da estrutura física do solo e a contaminação severa de

lençóis freáticos e mananciais superficiais. A introdução direta desses resíduos em corpos d'água provoca a rápida redução do oxigênio dissolvido, a proliferação desordenada de microrganismos e o processo de eutrofização, comprometendo a biodiversidade aquática (Matos, 2008; Matos *et al.*, 2017; Campos *et al.*, 2021).

Entretanto, o que inicialmente se configura como um passivo ambiental pode ser reconfigurado como um recurso valioso dentro do ecossistema produtivo. Devido à alta concentração de nutrientes essenciais às plantas, como potássio, nitrogênio e fósforo, o reaproveitamento dessa água por meio da fertirrigação ou de sistemas de tratamento biológico torna-se uma alternativa sustentável e economicamente viável. Essa prática não apenas reduz a necessidade de fertilizantes minerais sintéticos, mas também promove a reciclagem de nutrientes e a conservação das fontes hídricas, alinhando a cafeicultura aos modernos preceitos da economia circular (Janissen; Huynh, 2018).

Antes de seu reaproveitamento agrícola ou tratamento, a água residuária gerada durante o processamento do café necessita ser coletada e armazenada adequadamente, evitando sua liberação direta no ambiente. A Figura 16 apresenta tanques utilizados para o armazenamento temporário desse efluente, etapa fundamental para viabilizar seu tratamento e posterior utilização em práticas sustentáveis de manejo.



Figura 16. Tanques com água residuária resultante do processo de descascamento do café cereja. Fonte: Prezotti *et al.*, 2012.

Segundo Soares *et al.* (2007), a gestão hídrica no pós-colheita é um fator determinante para a eficiência operacional da propriedade, e a água utilizada no processamento do café pode receber diferentes destinações. Entre as estratégias de manejo, destacam-se a recirculação no próprio sistema de beneficiamento, o encaminhamento para unidades de tratamento para descarte controlado e, de forma crescente, o reaproveitamento estratégico em áreas agrícolas. Essas opções visam mitigar o volume de efluentes brutos gerados, aperfeiçoando o balanço hídrico da unidade processadora.

A implantação de sistemas de circuito fechado permite que a água de lavagem e despolpa retorne ao processo inicial após passar por filtros e decantadores, o que reduz drasticamente a captação em fontes naturais (Figura 17). Essa prática de recirculação, além de economizar recursos, concentra a carga orgânica no efluente final: embora demande um gerenciamento mais criterioso, facilita a posterior recuperação de subprodutos e minimiza a dispersão de poluentes no ambiente imediato.



Figura 17. Utilização de tanques de decantação de resíduos e uso de filtro ecológico para retenção de partículas. Fonte: Soares *et al.*, 2012.

A Figura 17 evidencia a importância das estruturas de tratamento primário na gestão sustentável dos efluentes gerados durante o processamento do café.

Os tanques de decantação e os filtros ecológicos atuam na retenção de sólidos suspensos e na redução da carga orgânica, permitindo que a água seja reutilizada de forma mais segura ou encaminhada para etapas complementares de tratamento. Essas tecnologias contribuem para a redução do consumo hídrico, minimizam os riscos de contaminação ambiental e favorecem o aproveitamento racional dos recursos disponíveis na propriedade.

Sob essa ótica, a reutilização da água residuária na fertirrigação consolida-se como uma técnica de elevada sinergia produtiva, apresentando potencial para reduzir o desperdício hídrico e diminuir a dependência de fertilizantes minerais sintéticos. Ao transformar o efluente em uma fonte de nutrientes e água para o cafezal, o produtor promove o fechamento do ciclo biogeoquímico na propriedade. Tal abordagem não apenas favorece a sustentabilidade da atividade cafeeira em longo prazo, mas também atende às rigorosas exigências de conformidade ambiental e certificações de mercado (Janissen; Huynh, 2018; Mantovani; Bernardo; Soares, 2021).

Em estudo realizado em propriedades cafeeiras no estado do Espírito Santo, Prezotti *et al.* (2012) observaram resultados satisfatórios quanto aos teores nutricionais presentes na água residuária proveniente do processamento dos frutos do café (Tabela 1).

Tabela 1. Teores máximos, mínimos e médios de nutrientes em amostras de águas residuárias coletadas em lagoas de deposição de 40 propriedades da Região produtora de café arábica do ES

Limites dos teores dos nutrientes	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	Mn	Fe	B
Máximo (mg L ⁻¹)	205	23	875	94	28	40	44	80	28	12
Mínimo (mg L ⁻¹)	1,5	1	1,5	1	1	1	1	1	0,3	1
Médio (mg L ⁻¹)	106	5	225	30	9	2	3	5	31	1
Desvio padrão	63	6	202	22	8	11	12	22	127	4
CV (%)	60	137	97	73	83	459	444	447	406	366

Fonte: Adaptado de Prezotti *et al.*, 2012.

A Tabela 1 evidencia elevada variabilidade na composição química da água residuária do café, especialmente para micronutrientes como Cu, Zn, Mn, Fe e B, que apresentaram coeficientes de variação superiores a 300%. Destaca-se ainda a elevada concentração de potássio (K), com valor médio de 225 mg L⁻¹ e máximos de até 875 mg L⁻¹, reforçando o potencial da água residuária como fonte complementar de nutrientes em sistemas de fertirrigação. Entretanto, a ampla variação observada entre as amostras indica a necessidade de monitoramento prévio da composição química antes de sua aplicação agrícola, de modo a evitar desequilíbrios nutricionais e riscos de contaminação ambiental.

Nesse contexto, o reaproveitamento da água residuária pode representar uma importante estratégia para o fornecimento de nutrientes às culturas agrícolas, especialmente em sistemas cafeeiros. Prezotti *et al.* (2012) ressaltam que sua utilização deve priorizar o aporte nutricional, devendo as doses ser definidas com base em análises químicas do efluente e nas exigências da cultura, de forma a garantir eficiência agrônômica e segurança ambiental.

Além disso, os autores destacam a importância da distribuição homogênea da água residuária nas áreas agrícolas, prevenindo o acúmulo excessivo em determinados pontos da lavoura. O manejo inadequado pode favorecer processos de anaerobiose, proliferação de microrganismos indesejáveis e redução da capacidade de absorção de nutrientes pelas plantas, comprometendo a eficiência do sistema de fertirrigação.

Outro aspecto relevante refere-se à necessidade de sistemas complementares de tratamento e armazenamento da água residuária antes de sua aplicação no solo. Tecnologias como lagoas de estabilização, biodigestores, filtros biológicos e sistemas de decantação têm sido utilizadas para reduzir a carga orgânica e minimizar os riscos ambientais associados ao uso inadequado desse resíduo (Matos *et al.*, 2017).

Além das formas tradicionais de reaproveitamento, o manejo sustentável da água residuária da cafeicultura também está diretamente relacionado aos princípios da economia circular. Nesse modelo produtivo, os resíduos deixam de ser considerados descartes e passam a ser reinseridos nos ciclos produtivos como insumos de valor agregado. Assim, a reutilização da água residuária

contribui não apenas para a redução dos impactos ambientais, mas também para maior eficiência no uso dos recursos naturais e fortalecimento da sustentabilidade na cadeia produtiva do café. A integração dessas estratégias de tratamento, armazenamento e reaproveitamento evidencia que a gestão da água residuária ultrapassa a simples mitigação de impactos ambientais, configurando-se como um componente estratégico da economia circular na cafeicultura (Figura 18).

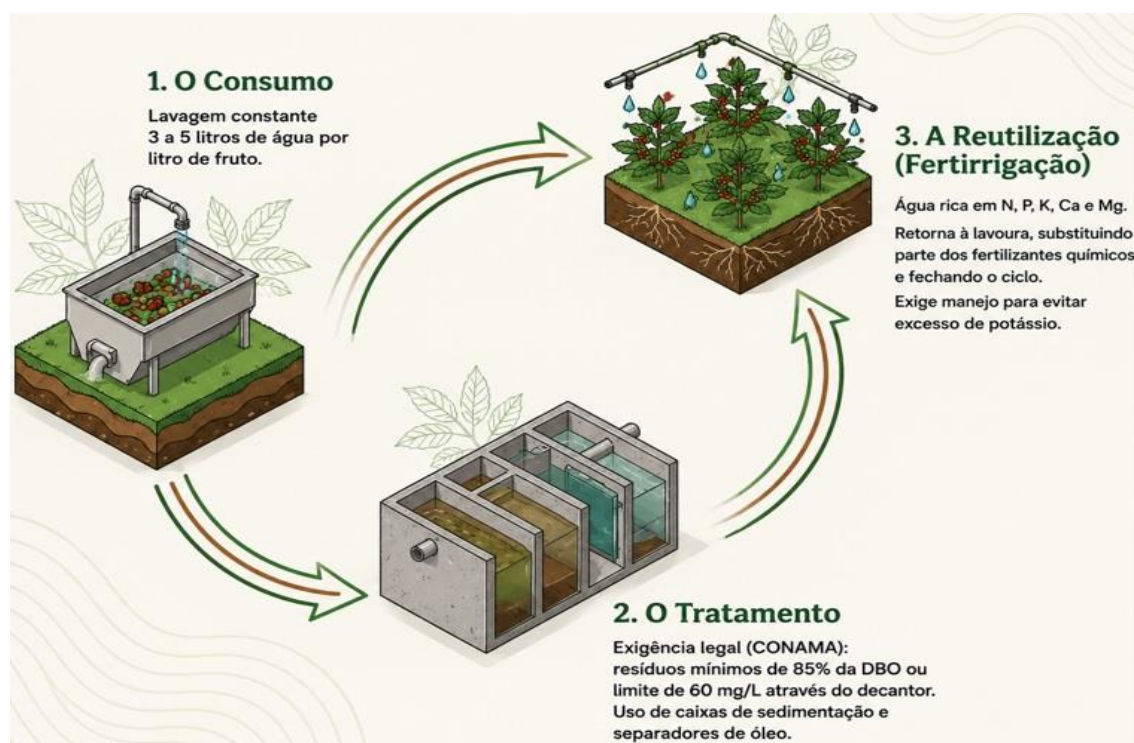


Figura 18. Gestão circular da água residuária: estratégias de tratamento e reaproveitamento na cadeia produtiva do café. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Dessa forma, o reaproveitamento adequado da água residuária proveniente do processamento via úmida constitui uma importante alternativa sustentável para a cafeicultura, promovendo conservação hídrica, ciclagem de nutrientes, redução de custos produtivos e mitigação dos impactos ambientais associados à produção cafeeira. Essa abordagem reconfigura a percepção dos efluentes, transformando-os de passivos ambientais em insumos estratégicos para a produção agrícola, o que fortalece a resiliência dos agroecossistemas

frente à escassez de recursos e consolida o compromisso da cadeia cafeeira com os princípios da governança ambiental e da economia circular.

Os exemplos apresentados nas seções anteriores demonstram que o manejo sustentável dos resíduos cafeeiros transcende a simples destinação adequada de materiais, gerando benefícios que se estendem às dimensões ambiental, social e econômica da atividade. Esses impactos positivos são discutidos de forma integrada na seção seguinte.

4. Benefícios ambientais, sociais e econômicos do manejo sustentável dos resíduos gerados na cafeicultura

Ao longo deste capítulo, evidenciou-se que a cadeia produtiva do café gera expressivas quantidades de resíduos sólidos, líquidos e orgânicos. Entretanto, quando manejados adequadamente, esses resíduos deixam de representar apenas um passivo ambiental e passam a constituir importantes recursos para a sustentabilidade da atividade cafeeira. Nesse contexto, o reaproveitamento de resíduos provenientes da cafeicultura apresenta benefícios ambientais, sociais e econômicos, fortalecendo sistemas produtivos mais resilientes e alinhados aos princípios da economia circular e da agroecologia.

Do ponto de vista ambiental, o manejo sustentável dos resíduos contribui significativamente para a redução da poluição do solo, da água e do ar. A reutilização de cascas, pergaminhos, polpas e águas residuárias diminui o descarte inadequado desses materiais no ambiente, reduzindo riscos de contaminação ambiental, proliferação de microrganismos e emissão de gases de efeito estufa (Maciel *et al.*, 2020). Além disso, o aproveitamento desses resíduos favorece a ciclagem de nutrientes e a conservação dos recursos naturais, promovendo maior equilíbrio ecológico nos sistemas agrícolas.

Entre os principais benefícios ambientais proporcionados pelo reaproveitamento dos resíduos cafeeiros destacam-se a utilização de fertilizantes naturais e biofertilizantes, a redução da dependência de fertilizantes químicos sintéticos e o reaproveitamento de resíduos orgânicos que, de outra forma, seriam descartados no ambiente. Essas práticas contribuem diretamente para a melhoria da fertilidade e da estrutura física do solo, favorecendo a

conservação da umidade, a redução dos processos erosivos e o aumento da atividade biológica. Adicionalmente, o manejo sustentável dos resíduos auxilia na redução da emissão de poluentes e gases de efeito estufa, ao mesmo tempo em que fortalece práticas agroecológicas e conservacionistas voltadas à manutenção da qualidade ambiental e da sustentabilidade dos agroecossistemas cafeeiros (ECOCERT, 2023).

No âmbito econômico, o manejo sustentável dos resíduos pode proporcionar redução significativa dos custos de produção, especialmente devido à menor necessidade de aquisição de fertilizantes minerais, corretivos e outros insumos agrícolas externos. Além disso, resíduos como cascas, pergaminhos e águas residuárias podem ser reaproveitados na geração de energia, compostagem e fertirrigação, agregando valor aos subprodutos da cafeicultura e ampliando as possibilidades de renda nas propriedades rurais (Murthy; Naidu, 2012; Zampieri *et al.*, 2021).

Outro aspecto importante refere-se à melhoria da produtividade e da qualidade dos grãos. Segundo o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE, 2022), práticas de manejo sustentáveis associadas à nutrição equilibrada das plantas favorecem o desenvolvimento adequado das lavouras, refletindo em maior produtividade, qualidade sensorial da bebida e valorização comercial do café produzido.

Sob a perspectiva social, a adoção de práticas sustentáveis na gestão dos resíduos contribui para melhores condições de trabalho, fortalecimento da agricultura familiar e promoção da conscientização ambiental no meio rural. A valorização do reaproveitamento de resíduos também estimula processos educativos voltados à sustentabilidade, incentivando produtores e comunidades rurais a adotarem práticas ambientalmente responsáveis.

Além disso, sistemas sustentáveis de manejo podem contribuir para a geração de emprego e renda em atividades relacionadas à compostagem, produção de biofertilizantes, reciclagem, geração de energia renovável e comercialização de produtos sustentáveis derivados da cafeicultura.

A integração dos benefícios ambientais, econômicos e sociais demonstra que o manejo sustentável dos resíduos cafeeiros transcende a simples mitigação

de impactos ambientais. Quando incorporados aos princípios da economia circular e da agroecologia, os resíduos passam a desempenhar funções estratégicas na geração de renda, na conservação dos recursos naturais e no fortalecimento da sustentabilidade das propriedades rurais. Dessa forma, a comparação entre os modelos convencionais de descarte e os sistemas de reaproveitamento permite compreender de maneira mais ampla os ganhos associados à valorização desses subprodutos ao longo da cadeia produtiva do café (Figura 19).



Figura 19. Benefícios ambientais, sociais e econômicos da valorização dos resíduos na cafeicultura. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A Figura 19 evidencia que a transição do modelo linear de produção para abordagens fundamentadas na agroecologia e na economia circular promove benefícios que extrapolam a esfera ambiental. A valorização dos resíduos contribui simultaneamente para a redução de custos, geração de oportunidades econômicas, fortalecimento da agricultura familiar e conservação dos recursos naturais, consolidando uma abordagem integrada de sustentabilidade para a cafeicultura.

Tais iniciativas fortalecem o desenvolvimento rural sustentável e ampliam a inserção da cafeicultura em mercados consumidores cada vez mais exigentes quanto às práticas ambientais adotadas na produção agrícola. Dessa forma, o

manejo sustentável dos resíduos gerados na cafeicultura constitui uma importante estratégia para promover equilíbrio entre produção agrícola, conservação ambiental e desenvolvimento socioeconômico.

A adoção dessas práticas contribui não apenas para a mitigação dos impactos e externalidades ambientais associados à atividade cafeeira, mas também para a construção de sistemas produtivos mais eficientes, sustentáveis e comprometidos com as futuras gerações. Entre as principais estratégias capazes de potencializar esses benefícios destacam-se as práticas agroecológicas, que promovem a redução, reutilização e valorização dos resíduos ao longo da cadeia produtiva do café.

5. Práticas agroecológicas e a redução e utilização de resíduos

A agroecologia tem se consolidado como uma importante alternativa para promover sistemas agrícolas mais sustentáveis, resilientes e ambientalmente equilibrados. Na cafeicultura, os princípios agroecológicos contribuem diretamente para a redução da geração de resíduos e para o reaproveitamento sustentável dos materiais produzidos ao longo da cadeia produtiva (Figura 20).



Figura 20. Integração entre reaproveitamento de resíduos e ciclagem de nutrientes em sistemas agroecológicos cafeeiros. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A Figura 20 ilustra como os princípios agroecológicos promovem a integração entre produção, reaproveitamento de resíduos e ciclagem de nutrientes, transformando os subprodutos da cafeicultura em recursos capazes de sustentar os processos ecológicos e produtivos do agroecossistema.

Essa abordagem busca integrar conservação ambiental, valorização dos recursos naturais, redução da dependência de insumos externos e fortalecimento da sustentabilidade econômica e social no meio rural. Essa dinâmica de integração permite converter o que seriam perdas em fluxos de energia e biomassa para o sistema (Altieri, 2012; Souza, 2026).

Diferentemente dos modelos convencionais de produção agrícola, a agroecologia propõe práticas que favorecem a ciclagem de nutrientes, o aumento da biodiversidade e o aproveitamento integral da biomassa produzida nos sistemas agrícolas. Nesse contexto, resíduos como cascas, polpas, pergaminhos e águas residuárias do café passam a ser compreendidos como recursos com potencial agrônomo e ecológico, deixando de representar apenas passivos ambientais (Gliessman, 2015; Peron *et al.*, 2026a; 2026b).

Entre as principais práticas agroecológicas aplicadas à cafeicultura destaca-se a compostagem dos resíduos orgânicos gerados na pós-colheita. A utilização de cascas, polpas e restos vegetais na produção de composto orgânico favorece o aumento da matéria orgânica do solo, melhora a retenção de água, amplia a disponibilidade de nutrientes e reduz a necessidade de fertilizantes químicos (Silva; Souza, 2021; Peron *et al.*, 2026a). Além disso, o uso de compostos orgânicos contribui para o fortalecimento da atividade biológica do solo e para a recuperação de áreas degradadas.

Outra prática importante refere-se ao uso de cobertura morta com resíduos cafeeiros. A aplicação de cascas e pergaminhos sobre o solo auxilia na conservação da umidade, redução da erosão, controle de plantas espontâneas e manutenção da temperatura do solo, proporcionando melhores condições para o desenvolvimento das culturas agrícolas (Murthy; Naidu, 2012; Crespo *et al.*, 2021; Crespo; Souza, 2022).

Os sistemas agroflorestais (SAFs) também representam importante estratégia agroecológica na cafeicultura sustentável. A integração entre

cafeeiros, espécies arbóreas e outras culturas agrícolas favorece a ciclagem de nutrientes, aumenta a biodiversidade e reduz a necessidade de insumos externos, favorecendo e ampliando a prestação de serviços ecossistêmicos. Além disso, resíduos vegetais produzidos nesses sistemas podem ser reincorporados ao solo, fortalecendo os processos naturais de decomposição e fertilização (Nair, 2011; Silva *et al.*, 2021).

Sob a perspectiva agroecológica, os SAFs operam como sistemas de elevada eficiência ecológica, nos quais diferentes estratos vegetais atuam de forma complementar na captura, armazenamento e reciclagem de nutrientes. A deposição contínua de serapilheira, composta por folhas, galhos finos, flores, frutos e resíduos de poda, promove a formação de cobertura orgânica sobre o solo, reduzindo perdas por erosão e favorecendo a atividade dos organismos decompositores.

Esse processo intensifica a ciclagem de nutrientes e amplia a disponibilidade de matéria orgânica, contribuindo para a manutenção da fertilidade do solo e para a redução da dependência de fertilizantes externos. A Figura 21 ilustra como a arquitetura dos sistemas agroflorestais favorece a circulação de biomassa e nutrientes, transformando resíduos vegetais em recursos estratégicos para a sustentabilidade do agroecossistema.

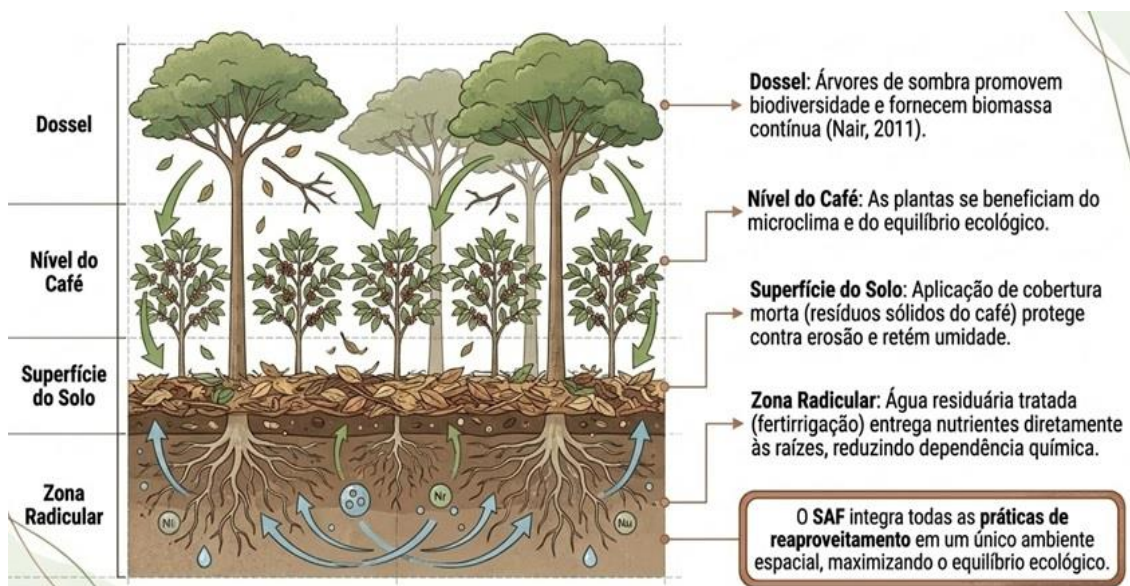


Figura 21. Sistemas agroflorestais e a ciclagem de biomassa e nutrientes na cafeicultura sustentável. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

No contexto do manejo hídrico, práticas agroecológicas incentivam o reaproveitamento da água residuária provenientes do processamento via úmida do café, desde que realizado de forma técnica e ambientalmente seguro. O uso racional desse resíduo na fertirrigação contribui para a redução do desperdício de água e para o aproveitamento de nutrientes presentes no efluente, promovendo maior eficiência no uso dos recursos naturais (Prezotti *et al.*, 2012; Mantovani; Bernardo; Soares, 2021).

Além dos benefícios ambientais, a agroecologia promove impactos e externalidades positivos nas dimensões social e econômica da cafeicultura. Segundo Caporal e Costabeber (2004), sistemas agroecológicos fortalecem a agricultura familiar, incentivam a autonomia dos produtores rurais e valorizam conhecimentos tradicionais associados ao manejo sustentável da terra.

Essa abordagem sistêmica permite que o agricultor deixe de ser um mero aplicador de pacotes tecnológicos externos para se tornar um gestor de processos ecológicos, o que favorece a segurança alimentar e a soberania das famílias no campo. A redução da dependência de fertilizantes e defensivos químicos, ao mitigar riscos ocupacionais e contaminações, contribui diretamente para a melhoria da qualidade de vida e a saúde das comunidades rurais (Figura 22).



Figura 22. Representação sistêmica de uma unidade produtiva agroecológica: integração entre gestão, solo e ecossistema. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A Figura 22 ilustra a lógica integrada dos sistemas agroecológicos, nos quais solo, plantas, biodiversidade, recursos hídricos e gestão da propriedade atuam de forma interdependente. Nessa perspectiva, a eficiência produtiva deixa de depender exclusivamente de insumos externos e passa a ser construída a partir do fortalecimento dos processos ecológicos, da ciclagem de nutrientes e da valorização dos recursos disponíveis na própria unidade produtiva.

Sob a ótica da sustentabilidade multidimensional, o manejo agroecológico atua como indutor de resiliência econômica, tornando a propriedade rural menos vulnerável às oscilações dos preços dos insumos sintéticos. Conforme Souza (2026), a transição para modelos produtivos de base ecológica exige não apenas mudanças técnicas, mas uma nova perspectiva de gestão ambiental, baseada na ciclagem de nutrientes e na valorização dos recursos locais para garantir a viabilidade da atividade agrícola em longo prazo. Assim, a cafeicultura sustentável consolida-se como um modelo de desenvolvimento rural que integra eficiência produtiva, inclusão social e justiça ambiental.

Outro aspecto relevante é a crescente valorização de cafés produzidos sob práticas sustentáveis e agroecológicas. Consumidores e mercados internacionais demonstram maior interesse por produtos associados à conservação ambiental, à responsabilidade social e à redução dos impactos ambientais, agregando valor à produção cafeeira (FAO, 2023). Esse cenário exige uma gestão integrada que harmonize produção, qualidade do solo e conservação ambiental, pilares da resiliência da cafeicultura (Figura 23).

A Figura 23 sintetiza os principais pilares que sustentam a transição para modelos mais resilientes de produção cafeeira. A integração entre gestão econômica eficiente, reaproveitamento de resíduos por meio da economia circular e fortalecimento dos serviços ecossistêmicos proporcionados pelos sistemas agroecológicos e agroflorestais permite ampliar simultaneamente a sustentabilidade ambiental, a viabilidade econômica e a inclusão social no meio rural. Essa abordagem integrada evidencia que a competitividade futura da cafeicultura dependerá cada vez mais da capacidade de harmonizar produtividade, conservação dos recursos naturais e geração de valor ao longo da cadeia produtiva.



Figura 23. Pilares da cafeicultura sustentável: integração entre gestão econômica, economia circular e sistemas agroflorestais. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Dessa forma, as práticas agroecológicas configuram-se como importantes ferramentas para a redução, reutilização e valorização dos resíduos gerados na cadeia produtiva do café. Ao promover a integração entre produção agrícola, conservação ambiental e ciclagem de nutrientes, a agroecologia contribui para a construção de sistemas cafeeiros mais resilientes, eficientes e comprometidos com o equilíbrio ecológico, a segurança produtiva e o desenvolvimento rural de longo prazo.

6. Considerações

Diante da posição estratégica ocupada pelo Brasil na cadeia produtiva mundial do café, tanto como principal produtor e exportador quanto como um dos maiores consumidores da bebida, torna-se cada vez mais necessário conciliar eficiência produtiva, competitividade econômica e responsabilidade socioambiental. Nesse contexto, o manejo sustentável dos resíduos gerados na cafeicultura emerge como um dos principais desafios e, simultaneamente, como uma das mais promissoras oportunidades para a construção de sistemas produtivos mais resilientes e alinhados aos princípios do desenvolvimento sustentável.

Ao longo deste capítulo, evidenciou-se que a produção e o processamento do café geram expressivos volumes de resíduos sólidos, líquidos e orgânicos, incluindo cascas, polpas, pergaminhos, borra de café e águas residuárias. Tradicionalmente tratados como passivos ambientais, esses materiais apresentam elevado potencial de valorização quando inseridos em estratégias de economia circular. Sob essa perspectiva, os resíduos deixam de representar um problema associado ao descarte e passam a constituir recursos capazes de retornar ao sistema produtivo na forma de fertilizantes orgânicos, biofertilizantes, condicionadores de solo, fontes de energia renovável e insumos para diferentes processos biotecnológicos.

Os resultados discutidos demonstram que a reutilização da casca, do pergaminho e da água residuária contribui significativamente para a ciclagem de nutrientes, para a melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo e para a redução da dependência de fertilizantes minerais e outros insumos externos. Além disso, práticas como compostagem, fertirrigação, produção de biochar, cobertura morta e reaproveitamento energético da biomassa fortalecem a eficiência no uso dos recursos naturais e reduzem os impactos e externalidades ambientais associados à atividade cafeeira.

Sob a ótica da agroecologia, verificou-se que o reaproveitamento dos resíduos transcende a simples destinação adequada de materiais. Quando integrado a sistemas agroflorestais (SAFs), à gestão ecológica do solo e ao manejo conservacionista da água, esse processo passa a desempenhar papel estratégico na manutenção dos serviços ecossistêmicos, no aumento da biodiversidade funcional, na conservação dos recursos naturais e na construção de agroecossistemas mais resilientes frente às mudanças climáticas e às oscilações econômicas. Nessa abordagem, o agricultor deixa de atuar apenas como usuário de insumos externos e assume a função de gestor de processos ecológicos, fortalecendo a autonomia produtiva e a sustentabilidade da propriedade rural.

Os benefícios observados não se restringem à dimensão ambiental. A redução de custos produtivos, a agregação de valor aos subprodutos, a geração de novas oportunidades econômicas e o crescente interesse dos mercados consumidores por produtos associados à responsabilidade socioambiental

ampliam a competitividade da cafeicultura sustentável. Paralelamente, a valorização do conhecimento local, a promoção da educação ambiental e o fortalecimento da agricultura familiar evidenciam a relevância social dessas práticas para o desenvolvimento rural.

Por fim, conclui-se que o futuro da cafeicultura sustentável depende da capacidade de integrar gestão econômica, economia circular e inteligência ecológica em uma mesma estratégia produtiva. A valorização dos resíduos gerados ao longo da cadeia do café representa não apenas uma alternativa ambientalmente adequada, mas uma mudança de paradigma capaz de transformar passivos ambientais em ativos produtivos. Dessa forma, o manejo sustentável dos resíduos consolida-se como uma ferramenta estratégica para promover produtividade, conservação ambiental, inclusão social e desenvolvimento rural, contribuindo para uma cafeicultura mais eficiente, regenerativa e comprometida com as demandas das gerações presentes e futuras.

7. Referências

- ABD MANAN, M. A. M. A.; MOHD ROZALI, A. N.; AZMI, S. S. S. Bioconversion of coffee pulp by *Hermetia illucens* larvae for nutrient-rich organic fertilizer. **Chemical Engineering Transactions**, Pisa, v. 117, p. 103-108, 2024.
- ABIC. Associação Brasileira da Indústria de Café. **Indicadores da indústria de café no Brasil 2025**. São Paulo: ABIC, 2025.
- ABIC. Associação Brasileira da Indústria de Café. **O café brasileiro na atualidade**. São Paulo: ABIC, 2021. Disponível em: ABIC. Acesso em: 12 jun. 2025.
- ALTIERI, M. A. **Agroecologia**: bases científicas para uma agricultura sustentável. 3. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2012.
- BESTETI, P. I. de O.; OLIVEIRA, C. de; CARVALHO, R. C. B.; ADÃO, J. E. A.; LIMA, M. da S. P. L.; AZEVEDO, P. P. M.; SOUZA, M. N. Vantagens da sustentabilidade na produção de café conilon: perspectivas ambientais e de mercado. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em Cafeicultura vol. v –**

Cafeicultura Agroecológica. Canoas: Mérida Publishers, 2025, p. 227-257. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-35-0.c8>.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

CAMPOS, A. T.; YANAGI JUNIOR, T.; DAMASCENO, F. A.; CAMPOS, A. T. de; MATTIOLI, M. C. Reuso de água residuária na cafeicultura e sustentabilidade ambiental. **Revista Brasileira de Agricultura Sustentável**, Viçosa, v. 11, n. 2, p. 45-58, 2021.

CAMPOS, R. C.; PINTO, V. R. A.; MELO, L. F.; ROCHA, S. J. S. S. da; COIMBRA, J. S. New sustainable perspectives for “Coffee Wastewater” and other by-products: a critical review. **Future Foods**, [S. l.], v. 4, e100058, 2021.

CAMPOS-VEGA, R.; LOARCA-PIÑA, G.; VERGARA-CASTAÑEDA, H. A.; OOMAH, B. D. Spent coffee grounds: a review on current research and future prospects. **Trends in Food Science & Technology**, Cambridge, v. 45, n. 1, p. 24-36, 2015. DOI: 10.1016/j.tifs.2015.04.012.

CAPORAL, F. R.; COSTABEBER, J. A. **Agroecologia e extensão rural:** contribuições para a promoção do desenvolvimento rural sustentável. Brasília: MDA/SAF/DATER, 2004.

CARDOZO, L. G. C.; LOUBACK, G. C.; PEÇANHA, A. L.; CAMPOS, P. A. C.; FIGUEIREDO, A. M.; S; P.; SOUSA, E. A. de; SOUZA, M. N.; CASTRO, A. S. de. Percepção de graduandos da Universidade Federal do Espírito Santo Campus Alegre - ES, em relação aos resíduos sólidos. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, v. 17, p. e6290, 2024. Disponível em: <https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/issue/view/40>. DOI: 10.55905/revconv.17n.4-108.

CARVALHO, A. M. de; FAGIOLI, M.; SILVA, C. A.; ACCIOLY, A. M. A. Decomposição de resíduos orgânicos e disponibilização de nutrientes em sistemas de produção de café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 100-110, 2009.

CECAFÉ. Conselho dos Exportadores de Café do Brasil. **Relatório anual das exportações brasileiras de café 2025.** São Paulo: CECAFÉ, 2025.

CRESPO, A. M.; GONCALVES, D. C.; SOUZA, M. N.; ZANUNCIO JUNIOR, J.

S.; COSTA, H.; FAVARATO, L. F.; RANGEL, O. J. P.; ARAUJO, J. B. S. **Manejo da lagarta-do-cartucho do milho (*Spodoptera frugiperda*):** panorama geral das atualizações no controle alternativo. Boletim Técnico 6. 1 ed. VITÓRIA: Edifes, 2021, v. 6, 20 p.

CRESPO, A. M.; SOUZA, M. N. Plantio direto de milho-verde orgânico sobre diferentes plantas de cobertura de verão. In: VARNIER, E.; VIEIRA, L. H. S.; MENINI, L.; SILVEIRA, L. F. V.; SANTOS, M. C. P.; MEIRELES, R. C. (Org.). **Coletânea Multicampi de Trabalhos em Pesquisa, Extensão e Ensino: IFES Alegre, Itapina e Santa Teresa /– Curitiba: CRV, 2022. 186 p. (Coleção Produção Acadêmica – IFES em Rede, v. 1). 2022. p. 37-38.**

DURÁN, C. A. A.; TSUKUI, A.; SANTOS, F. K. F.; MARTINEZ, S. T.; BIZZO, H. R.; REZENDE, C. M. Café: aspectos gerais e seu aproveitamento para além da bebida. **Revista Virtual de Química**, Niterói, v. 9, n. 1, p. 107-134, 2017. DOI: 10.21577/1984-6835.20170010.

ECOCERT. **Agricultura sustentável e economia circular na cafeicultura.** França: Ecocert, 2023.

ECOCERT. **O impacto ambiental da produção de café e as vantagens das práticas sustentáveis.** França: Ecocert, 2023. Disponível em: Ecocert. Acesso em: 27 jun. 2025.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The future of food and agriculture: drivers and triggers for transformation.** Rome: FAO, 2023.

FARIA, F. P. S.; MACHADO, P. P.; AZEVEDO, A. L. B. P.; OLIVEIRA, A. de F. M. de; DESTEFANI, J. D.; SOUZA, M. N. Resíduos agrícolas da pecuária leiteira. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas. vol. v. – Canoas, RS: Mérida Publishers, 2023. 348 p. ISBN: 978-65-84548-12-1. DOI: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-12-1.c7>**

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, Washington, v. 3, n. 7, p. 1-5, 2017.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecology: the ecology of sustainable food systems.** 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.

GOMES, J. P. A.; MOULIN, M. M.; SANTOS JÚNIOR, A. C.; SOUZA, M. N. **Agricultura orgânica e microrganismos eficientes: aumento produtivo de forma sustentável** / João Paulo Andrade Gomes ... [et al.] – Alegre: Edifes acadêmico, 2022. 22 f. il. ISBN: 978-85-8263-584-1 (livro digital). 9788582635841.

GOMES, J. P. A.; SOUZA, M. N.; SANTOS JÚNIOR, A. C.; MOULIN, M. M. Uso de microrganismos eficientes como alternativa para agricultura sustentável: um referencial teórico, p. 340-355, 2021. In: SOUSA, C da S.; LIMA, F. de S.; SABIONI, S. C. **Agroecologia** [livro eletrônico]. Métodos e técnicas para uma agricultura sustentável: volume 5 /Guarujá, SP: Científica Digital, 2021. 372 p.

JANISSEN, B.; HUYNH, T. Coffee processing wastewater management and sustainability. **Environmental Technology Reviews**, London, v. 7, n. 1, p. 1-14, 2018.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (ed.). **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. 2. ed. London: Routledge, 2015. 944 p.

LEHMANN, J.; RILLIG, M. C.; THIES, J.; MASIELLO, C. A.; HOCKADAY, W. C.; CROWLEY, D. Biochar effects on soil biota: a review. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 43, n. 9, p. 1812-1836, 2011. DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.04.022.

LOPES, I.; FERREIRA, J. P.; SILVA, M. A.; OLIVEIRA, R. S.; COSTA, A. C. Identification of solid and liquid waste from coffee production and its potential uses: a review. **Revista Delos: Desarrollo Local Sostenible**, Málaga, p. 3625-3646, 2023.

LOPES, R. M. *et al.* Resíduos plásticos e impactos ambientais na cadeia produtiva do café. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 12, n. 3, p. 88-104, 2023.

MACIEL, F. S.; HOLANDA, J. N. F. de; LOIOLA, R. L.; MACIEL, L. A. R.; GONÇALVES, V. S. Aplicabilidade de resíduo borra de café como matéria-prima alternativa na obtenção de material cerâmico. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE, 3., 2020, Gramado. **Anais [...]**. Gramado: IBEAS, 2020. p. 1-5.

MACIEL, V. G.; FERREIRA, M. de F.; ETCHEPARE, L. M. S.; SOUZA, E. B. R. de; COSTA, J. A. V.; JACOB-LOPES, E. Environmental performance and waste management in the coffee production chain. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 246, art. 119036, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119036>.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; SOARES, A. A. **Manual de Irrigação**. 10. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2021.

MATOS, A. T. de. **Tratamento de resíduos líquidos de salas de preparo via úmida de frutos do cafeeiro**. Viçosa: Editora UFV, 2008. 40 p.

MATOS, A. T. de; CARVALHO, M. P. de; SOARES, E. R.; BORGES, A. C. Tratamento e aproveitamento agrícola de águas residuárias da cafeicultura. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 11, n. 5, p. 1760-1772, 2017.

MEDINA, J.; PANETTIERI, M.; CALABI-FLOODY, M.; PLAZA, C.; KNICKER, H. Biochar and metallic nanoparticle additives in agricultural residues composting modulate the mineralization patterns of end-products when added to tropical soils. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 25, n. 2, p. 2261-2274, 2025.

MENDONÇA, G. S.; RODRIGUES, R. M.; OLIMPIO, S. de O.; SANTOS, A. T. B. dos; OLIVEIRA, C. H. R. de; COSTA, W. M. da; AMARAL, A. A. do; SOUZA, M. N. Uso de resíduos orgânicos na formulação de substratos para a produção de mudas de espécies florestais nativas da Mata Atlântica. In: SOUZA, M. N. (org.). **Tópicos em Gestão Ambiental: v. 5**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026. p. 175-197. ISBN 978-65-84548-45-9. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-45-9.c5>

MURTHY, P. S.; NAIDU, M. M. Sustainable management of coffee industry by-products and value addition: a review. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 66, p. 45-58, 2012.

MUSSATTO, S. I.; MACHADO, E. M. S.; MARTINS, S.; TEIXEIRA, J. A. Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. **Food and Bioprocess Technology**, New York, v. 4, n. 5, p. 661-672, 2011. DOI: [10.1007/s11947-011-0565-z](https://doi.org/10.1007/s11947-011-0565-z).

NAIR, P. K. R. Agroforestry systems and environmental quality: introduction. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 40, n. 3, p. 784-790, 2011.

PANDEY, A.; SOCCOL, C. R.; NIGAM, P.; BRAND, D.; MOHAN, R.; ROUSSOS, S. Biotechnological potential of coffee pulp and coffee husk for bioprocesses. **Biochemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 6, n. 2, p. 153-162, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1369-703X\(00\)00084-X](https://doi.org/10.1016/S1369-703X(00)00084-X).

PERFECT DAILY GRIND. **Coffee by-products and sustainability in coffee production**. 2024. Disponível em: <https://perfectdailygrind.com>. Acesso em: 08 maio 2026.

PERON, I. B.; CARVALHO, R. C. B.; PINTO, G. P.; EGÍDIO, L. S.; VIEIRA, R. C.; SOUZA, M. N. Práticas agroecológicas e orgânicas: soluções sustentáveis para os desafios globais da segurança alimentar. In: RANGEL, O. J. P. *et al.* (org.). **Tópicos em agroecologia: vol. v**. Vitória: Edifes Acadêmico, 2026a. p. 01-18. Disponível em: <http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/1174889>. ISBN: 978-65-5331-162-6. DOI: 10.36524/978-65-5331-162-6.

PERON, I. B.; EGIDIO, L. S.; SOUZA, M. N.; RANGEL, O. J. P.; PELUZIO, J. B. E.; ARAUJO JUNIOR, A. C. Transição agroecológica no Sítio Recanto da Serra: do convencional ao sistema orgânico de produção. In: RANGEL, O. J. P. *et al.* (org.). **Tópicos em agroecologia vol. v**. Vitória: Edifes Acadêmico, 2026b. p.19-38. Disponível em: <http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/1174889>. ISBN: 978-65-5331-162-6. DOI: 10.36524/978-65-5331-162-6.

PIGNATI, W. A.; CARNEIRO, F. F.; ALEXANDRE, L. A.; OLIVEIRA, N. P. de; SOUZA, S. H. de; SOUZA, M. R. de; FERNANDES, C. R.; FACCHINI, L. A. Distribuição espacial do uso de agrotóxicos no Brasil: uma ferramenta para a Vigilância em Saúde. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 10, p. 3281-3293, 2017.

PREZOTTI, L. C.; MORELI, A. P.; SOARES, S. F.; ROCHA, A. C. da. **Teores de nutrientes nas águas residuárias do café e características químicas do solo após sua aplicação**. Vitória: Incaper, 2012. 24 p. (Documentos, 208). Disponível em: Biblioteca Digital Incaper. Acesso em: 27 jun. 2025.

REHAGRO. **Plantio de café: 6 recomendações para a sua lavoura**. 2025. Acesso em: 12 jun. 2025.

SCHWAN, R. F.; VILELA, D. M. **Fermentação do café**: da ciência à prática. Lavras: Ed. dos Autores, 2022.

SEBRAE. **Boas práticas sustentáveis na cafeicultura brasileira**. Brasília: SEBRAE, 2022.

SEBRAE. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **As características e as vantagens da produção sustentável de café**. Brasília: SEBRAE, 2023. Disponível em: SEBRAE. Acesso em: 27 jun. 2025.

SILVA, J. M. V. de O. da; SOUZA, M. N.; RANGEL, O. J. P.; LOPES, J. F.; LIMA, M. da S. P. Produção de café orgânico: práticas agroecológicas conservacionistas e novas tecnologias disponíveis ao produtor rural. p. 141-178. 2024. In: SIMÃO, J. B. P.; PELUZIO, J. B. E.; PELUZIO, T. M. de; LIMA, M. da S. P.; BESTETI, P. I. O.; LOPES, A. C.; FERBEK, G. J. V. (Org.). **A cafeicultura do Caparaó**: resultados de pesquisas Vol. VII. Alegre, ES: Instituto Federal de Educação, Ciência e tecnologia do Espírito Santo, 2024. 264 p. ISBN: 978-85-8263-867-5. Formato: e-book PDF (livro digital).

SILVA, J. M. V. O.; SOUZA, M. N. **Produção de café orgânico**: práticas agroecológicas conservacionistas e novas tecnologias disponíveis ao produtor rural. 1. ed. Mauritius: Novas Edições Acadêmicas, 2021. 72 p.

SILVA, J. M. V. O.; SOUZA, M. N.; RANGEL, O. J. P.; FORNAZIER, M. L.; LOUBACK, G. C.; PIROVANI, G.; SIQUEIRA, C. B. **Sistemas agroflorestais (SAFs) e a cafeicultura**. In: Produção de café orgânico: práticas agroecológicas conservacionistas e novas tecnologias disponíveis ao produtor rural. 1. ed. Meidrum Street, Mauricius: Novas Edições Acadêmicas, 2021, v.1, p. 40-50.

SILVA, M. M. da; SILVA, M. M. da; CARVALHO, C. S.; VIÇOSI, D. B.; SIMÃO, J. B. P.; PERON, I. B.; ALVES, D. I.; CARVALHO, R. C. B.; PINTO, G. P.; SOUZA, M. N. Agroecologia e a produção de cafés especiais. In: SOUZA, M. N.; SIMÃO, J. B. P. **Tópicos em cafeicultura Vol. IV – Cafés Especiais**. Canoas: RS. Mérida Publishers. 258 p. 2024. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-28-8>.

SILVERIO, M. B.; PAGANE, H, A.; JÚNIOR, A. J. Análise bibliográfica sobre os principais elementos que influenciam o processo de compostagem. **Agronomia de Precisão**: Inovações e Impacto no Campo, v. 1, n. 1, p. 1-25, 2025.

SOARES, A. A.; MATOS, A. T. de; LO MONACO, P. A. V.; SILVA, D. D. da; CECOM, P. R. Manejo e reutilização de águas residuárias na cafeicultura. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 54, n. 313, p. 472-479, 2007.

SOARES, A. A.; MATOS, A. T. de; LO MONACO, P. A. V.; SILVA, D. D. da; CECOM, P. R. Uso de água residuária do processamento dos frutos do cafeeiro em sistemas agrícolas. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 16, n. 1, p. 41-49, 2008.

SOARES, S. F.; DONZELES, S. M. L.; MORELI, A. P.; ROCHA, A. C.; SOARES, G. F.; SOARES, V. F. **Água residuária do café: geração e aproveitamento**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2008. (Circular Técnica, 30).

SOARES, S. S.; SOARES, V. F.; SOARES, G. S.; ROCHA, A. C. da; MORELI, A. P.; PREZOTTI, L. C. **Destinação da água residuária do processamento dos frutos do cafeeiro**. Vitória: Incaper, 2007.

SOARES, S. F.; MORELI, A. P.; DONZELES, S. M. L.; PREZOTTI, L. C. **Reuso da água na produção de café cereja descascado**. Brasília: Embrapa Café, 2012. 8 p. (Circular Técnica, 1). Disponível em: Infoteca-e/Embrapa Café. Acesso em: 27 jun. 2025.

SOUZA, M. N. Agroecologia: fundamentos conceituais e princípios orientadores. In: SOUZA, M. N. **Agroecologia: a sustentabilidade verde - da agricultura convencional à transformação agroecológica**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026. p. 21-32. ISBN: 978-65-84548-44-2. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-44-2.c1>.

SOUZA, M. N. **Economia aplicada à valoração ambiental e sistemas de gestão ambiental: modelos aplicados à promoção do desenvolvimento sustentável**. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental Integrada. BH: IETEC, 2006. 248 p.

SOUZA, M. N. Prefácio. **Tópicos em agroecologia vol. V**. Canoas: Mérida Publishers, 2026. p. 4-7 Disponível em: <http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/1174889>. ISBN: 978-65-5331-162-6. DOI: 10.36524/978-65-5331-162-6.

SOUZA, M. N. **Tópicos em agroecologia vol. V**. Canoas: Mérida Publishers. 2026. 346 p. Disponível em:

<http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/1174889>. ISBN: 978-65-5331-162-6. DOI: 10.36524/978-65-5331-162-6.

SOUZA, M. N.; SIMÃO, J. B. P. **Tópicos em cafeicultura vol. IV – Cafés Especiais**. Canoas: RS. Mérida Publishers. 258 p. 2024. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-28-8>.

TSIGKOU, K.; DEMISSIE, B. A.; HASHIM, S.; GHOFrani-ISFAHANI, P.; THOMAS, R.; MAPINGA, K. F.; KASSAHUN, S. K.; ANGELIDAKI, I. Coffee processing waste: unlocking opportunities for sustainable development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 210, art. 115263, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115263>. Disponível em: ScienceDirect. Acesso em: 11 jun. 2025.

UNIÃO DOS EXPORTADORES DO BRASIL. **O recorde histórico das exportações de café do Brasil em 2024**. Rio de Janeiro: AEB, 2025. Disponível em: AEB. Acesso em: 15 jun. 2025.

ZAMPIERI, A. S.; SILVA, M. R.; OLIVEIRA, J. P.; SOUZA, F. A. Manejo de resíduos e subprodutos da cafeicultura: uma abordagem fundamentada na bioeconomia e economia circular. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, São Paulo, v. 15, p. 1-18, 2021.

ZAMPIERI, F. G.; ZAMPIERI, F. R. O.; BESTETI, P. I. de O.; SOUZA, M. A. A. da S.; BERMOND, K. Z.; NOVAES, C. A. de; PANCOTTO, T. A.; GOMES, A. L. C.; NOVAES, G. A. de; MUNIZ, F.; SOUZA, M. N. Café, solo e saber: a educação ambiental como instrumento de sustentabilidade na agroecologia. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em Cafeicultura Vol. V – Cafeicultura Agroecológica**. Canoas: Mérida Publishers, 2025, p. 282-306. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-35-0.c10>.

ZHAO, W.; CAO, X.; PAN, H.; LOU, Y.; WANG, H.; YANG, Q.; ZHUGE, Y. Effects of Biochar on Cadmium availability, nitrification and microbial communities in soils with varied pH levels. **Microorganisms**, v. 13, n. 17, p. 839, 2025.

CAPÍTULO 5

Segurança do trabalho e sustentabilidade na cafeicultura: contribuições da agroecologia para ambientes produtivos mais seguros

Mateus Madeira da Silva, Dayane Vitoria Silva Mello, Thaís de Souza Pastor,
Gilmara da Silva Rangel, Willian Moreira da Costa, Maurício Novaes Souza

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-46-6.c5>

Resumo

A segurança do trabalho na cafeicultura permanece como um desafio relevante diante da complexidade das atividades desenvolvidas ao longo da cadeia produtiva. Este estudo analisa os principais riscos ocupacionais presentes no ambiente cafeeiro, incluindo a exposição a agrotóxicos, acidentes envolvendo máquinas e equipamentos agrícolas, quedas, sobrecargas ergonômicas e acidentes com animais peçonhentos. Paralelamente, discute-se o potencial das tecnologias emergentes na mitigação desses agravos, destacando sensores baseados em Internet das Coisas (IoT), drones para monitoramento de áreas de risco, sistemas digitais de gestão e ferramentas de automação aplicadas à segurança ocupacional. O trabalho também aborda estratégias integradas de prevenção, contemplando medidas de proteção individual e coletiva, capacitação dos trabalhadores e gestão preventiva dos riscos. Adicionalmente, destaca-se a contribuição da agroecologia para a promoção de ambientes laborais mais seguros, por meio da redução da dependência de insumos químicos, da diversificação produtiva, da adoção de sistemas agroflorestais e da melhoria das condições ambientais e microclimáticas. A literatura analisada indica que a integração entre inovação tecnológica, gestão preventiva e princípios agroecológicos contribui para a redução dos riscos ocupacionais, para a promoção da saúde dos trabalhadores e para o fortalecimento da sustentabilidade na cafeicultura. Conclui-se que a convergência entre segurança do trabalho, transformação tecnológica e agroecologia constitui uma estratégia promissora para o desenvolvimento de sistemas cafeeiros mais seguros, resilientes e sustentáveis.

Palavras-chave: Segurança do trabalho rural. Cafeicultura. Agroecologia. Saúde ocupacional. Gestão de riscos. Agricultura digital. Sustentabilidade.

1. Introdução

A cafeicultura, um dos setores mais relevantes da economia brasileira, segue enfrentando desafios significativos relacionados à segurança e à saúde no trabalho. Em 2025, os riscos tradicionais, como a exposição a agrotóxicos, acidentes com máquinas agrícolas e quedas, são intensificados por fatores emergentes, incluindo as mudanças climáticas e a crescente automação das atividades no campo. A literatura evidencia que a exposição a agrotóxicos continua sendo um dos principais fatores de risco à saúde do trabalhador rural, impactando diretamente a produtividade e o bem-estar (Antle; Pingali, 1994; WHO, 2025).

Dados recentes indicam que grande parte dos acidentes no setor cafeeiro está associada a comportamentos inseguros e à ausência de condições adequadas de trabalho, como falhas em dispositivos de proteção de máquinas e não utilização de equipamentos de proteção individual (CEREST, 2025; OIT, 2025).

Entre as principais causas de acidentes rurais, destacam-se a precariedade das condições operacionais, a insalubridade do ambiente, o manuseio inadequado de ferramentas, a intoxicação por fitossanitários, a operação incorreta de máquinas e implementos agrícolas, jornadas excessivas de trabalho e falhas mecânicas em equipamentos, especialmente nos sistemas de freio, direção e sinalização (Vilela; Almeida; Mendes, 2003; Baesso *et al.*, 2018) (Figura 1).

A complexidade desses fatores evidencia que os acidentes na cafeicultura não decorrem de uma única causa, mas da interação entre aspectos ambientais, organizacionais, tecnológicos e humanos. Nesse contexto, a ergonomia aplicada à interação entre máquina e operador assume papel central na prevenção de acidentes e doenças ocupacionais. Conforme estabelece a Norma Regulamentadora nº 31, as máquinas e ferramentas devem proporcionar postura adequada, boa visualização e condições seguras de operação, promovendo segurança e eficiência no sistema homem-máquina (BRASIL, 2024). Estudos recentes reforçam que as cargas ergonômicas associadas à colheita manual do café podem gerar impactos biomecânicos significativos, especialmente quando

as atividades são executadas sem adequações ergonômicas apropriadas (ERGOCAFÉ/UFV, 2025).

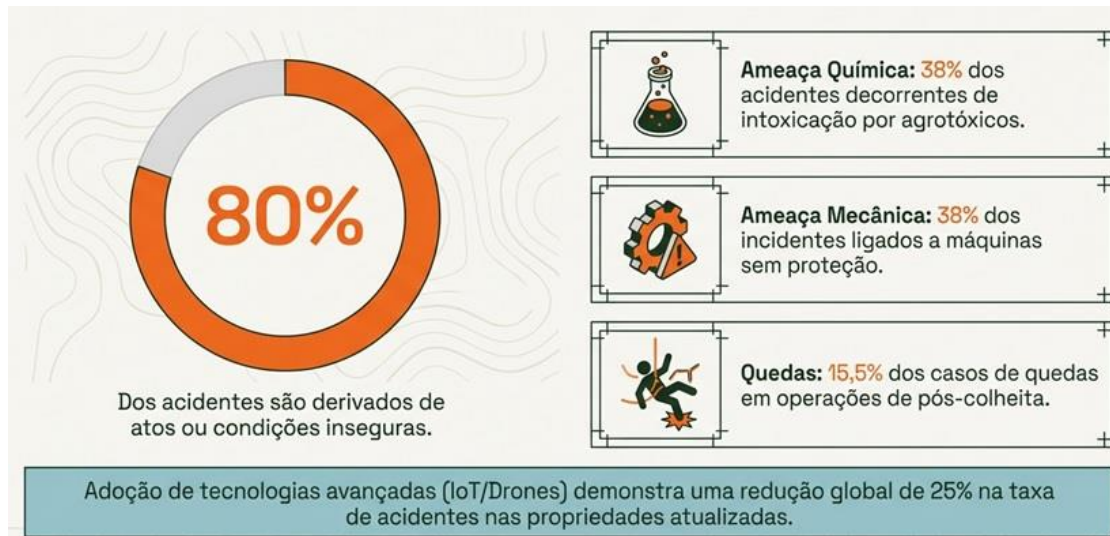


Figura 1. Principais condicionantes dos riscos à saúde e à segurança do trabalhador na cafeicultura. Fonte: Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Adicionalmente, a percepção de risco por parte dos trabalhadores influencia diretamente a adoção de práticas seguras, especialmente no manejo de agrotóxicos, sendo frequentemente subestimada em contextos de baixa capacitação técnica (Evangelista, 2023). Nesse cenário, abordagens integradas, como o conceito “One Health”, têm sido propostas para articular saúde humana, ambiental e produtiva na cafeicultura (FAO, 2025).

Diante da relevância social e econômica da atividade cafeeira, torna-se imprescindível fortalecer sistemas de gestão que incorporem práticas eficazes de segurança e saúde no trabalho. Considerando que o setor emprega significativa mão de obra familiar e contratada, este estudo busca identificar fragilidades nos sistemas produtivos cafeeiros quanto ao atendimento das normas brasileiras de SST.

Além dos aspectos diretamente relacionados à prevenção de acidentes e doenças ocupacionais, a discussão contemporânea sobre segurança no trabalho rural está inserida em um contexto mais amplo de sustentabilidade dos sistemas produtivos. Sob a perspectiva do desenvolvimento sustentável, um sistema de

produção deve integrar, ao longo de todas as suas etapas, práticas que minimizem impactos ambientais e sociais, promovam rentabilidade e assegurem condições dignas de trabalho (ONU, 2003; MMA, 2017; UCDavis, 2017). A transição do modelo de desenvolvimento econômico tradicional para o desenvolvimento sustentável, consolidada a partir da Agenda 21 e reforçada nos debates da Rio+20, destaca a necessidade de sistemas produtivos socialmente justos, economicamente viáveis e ambientalmente adequados.

Nesse contexto, a produção sustentável na cafeicultura deve ir além da qualidade ambiental e econômica, incorporando de forma explícita a segurança e a saúde do trabalhador como pilares fundamentais. Entretanto, ainda se observa uma lacuna na integração efetiva de diretrizes específicas de SST nos modelos de produção sustentável, evidenciando a necessidade de avanços teóricos e práticos nesse campo. Assim, torna-se fundamental compreender como os riscos ocupacionais se manifestam ao longo das diferentes etapas da cadeia produtiva do café, desde as atividades de implantação e manejo da lavoura até as operações de colheita e pós-colheita.

2. Principais riscos ocupacionais nas etapas de produção, colheita e pós-colheita

A produção de café compreende um conjunto de etapas interdependentes, da pré-colheita à pós-colheita, cada uma delas caracterizada por diferentes condições operacionais e, conseqüentemente, por riscos específicos à saúde e à segurança dos trabalhadores. Na fase de pré-colheita, atividades como preparo do solo, adubação e aplicação de defensivos agrícolas expõem os trabalhadores a riscos químicos, especialmente pela manipulação de fitossanitários, além de riscos ergonômicos e mecânicos associados ao uso de equipamentos e implementos (Antle; Pingali, 1994; WHO, 2025).

Durante a colheita, sobretudo quando realizada manualmente, destacam-se os riscos ergonômicos decorrentes de posturas inadequadas, movimentos repetitivos e sobrecarga física, além de acidentes com ferramentas e exposição a animais peçonhentos (ERGOCAFÉ/UFV, 2025). Já na colheita mecanizada, aumentam os riscos relacionados à operação de máquinas, incluindo falhas

mecânicas, ausência de dispositivos de proteção e baixa qualificação dos operadores (Baesso *et al.*, 2018).

Embora os riscos ocupacionais estejam presentes em todas as fases da produção cafeeira, sua natureza e intensidade variam de acordo com as operações executadas, o nível de mecanização adotado e as condições ambientais do local de trabalho. Enquanto a pré-colheita concentra riscos químicos, mecânicos e ergonômicos relacionados ao manejo da lavoura, a colheita incorpora demandas físicas intensas e riscos associados à interação entre trabalhadores e máquinas. Na pós-colheita, por sua vez, destacam-se os riscos decorrentes do beneficiamento, da secagem e do armazenamento dos grãos. Dessa forma, a segurança do trabalho na cafeicultura deve ser compreendida de maneira sistêmica, considerando a dinâmica dos riscos ao longo de todo o processo produtivo (Figura 2).

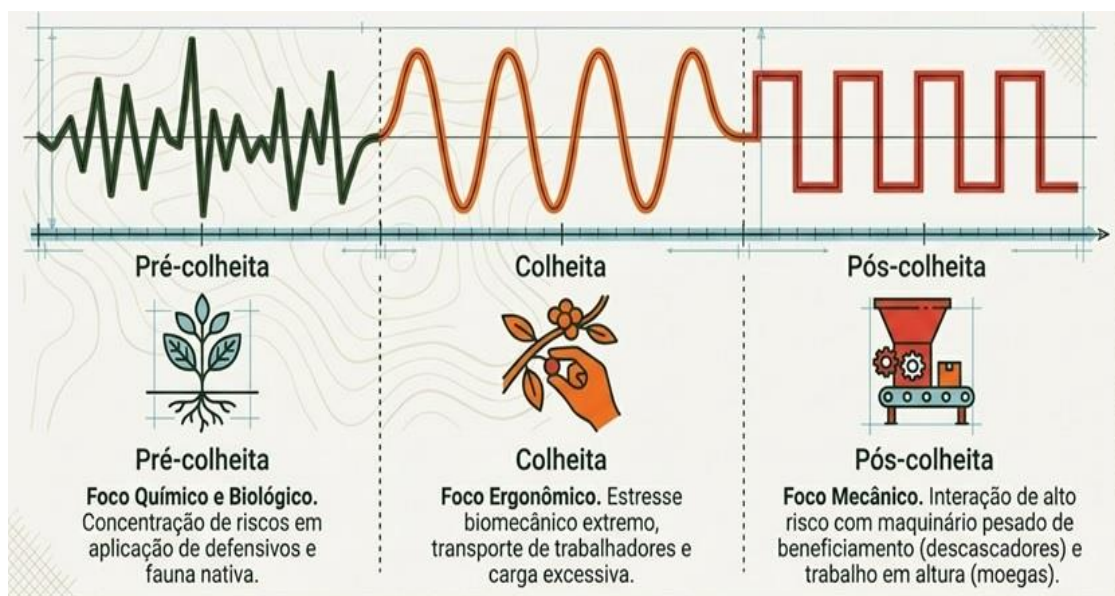


Figura 2. Principais riscos ocupacionais nas etapas de produção, colheita e pós-colheita do café. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A análise conjunta dessas etapas evidencia que os riscos ocupacionais na cafeicultura assumem características distintas ao longo do processo produtivo, exigindo medidas preventivas específicas para cada situação de trabalho. Enquanto na pré-colheita predominam os riscos químicos e mecânicos

associados ao manejo da lavoura, durante a colheita destacam-se as sobrecargas ergonômicas e os acidentes envolvendo ferramentas e máquinas. Na pós-colheita, por sua vez, tornam-se mais relevantes os riscos relacionados ao beneficiamento, à secagem, ao armazenamento dos grãos e à operação de equipamentos. Dessa forma, a compreensão integrada dos riscos ao longo de toda a cadeia produtiva é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de prevenção, reforçando a importância de práticas de segurança e saúde no trabalho adaptadas às especificidades de cada etapa do sistema cafeeiro (Baesso *et al.*, 2018; Vilela; Almeida; Mendes, 2003; Brasil, 2024).

Dessa forma, a compreensão integrada dos riscos ao longo de toda a cadeia produtiva é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de prevenção, reforçando a importância de práticas de segurança e saúde no trabalho adaptadas às especificidades de cada etapa do sistema cafeeiro.

2.1. Pré-colheita

Na fase de pré-colheita, os riscos ocupacionais estão fortemente associados ao uso de agrotóxicos, constituindo uma das principais ameaças à saúde dos trabalhadores da cafeicultura. Além da exposição durante o preparo e a aplicação das caldas, há contato com resíduos presentes nas plantas, no solo, nos equipamentos e nas embalagens. Somam-se a esses fatores os riscos ergonômicos decorrentes do transporte de insumos, da operação de pulverizadores e da realização de atividades repetitivas em condições ambientais adversas. Assim, a pré-colheita concentra diversos fatores de risco capazes de comprometer a saúde e a segurança dos trabalhadores em curto e longo prazo (Antle; Pingali, 1994; Peres; Moreira, 2007; Rigotto *et al.*, 2014; Brasil, 2024; WHO, 2025) (Figura 3).

O Brasil figura entre os maiores consumidores mundiais desses insumos. Os registros de intoxicação permanecem expressivos, muitas vezes relacionados ao uso inadequado, à ausência de equipamentos de proteção individual (EPIs) ou à baixa percepção de risco por parte dos aplicadores (Antle; Pingali, 1994; Evangelista, 2023; WHO, 2025). Além dos efeitos agudos, a exposição crônica a determinados compostos, como os organofosforados, pode

desencadear distúrbios neurológicos e neuromusculares de manifestação tardia, agravando o quadro de saúde ocupacional no meio rural.



Figura 3. Principais condicionantes dos riscos ocupacionais na fase de pré-colheita do café. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Com o avanço tecnológico, algumas propriedades têm adotado soluções que contribuem para a mitigação desses riscos, como tratores com cabines pressurizadas, sistemas de aplicação mais precisos (*drones* de mapeamento térmico) e tecnologias de monitoramento que reduzem a exposição direta dos trabalhadores aos agentes químicos (Figura 4).

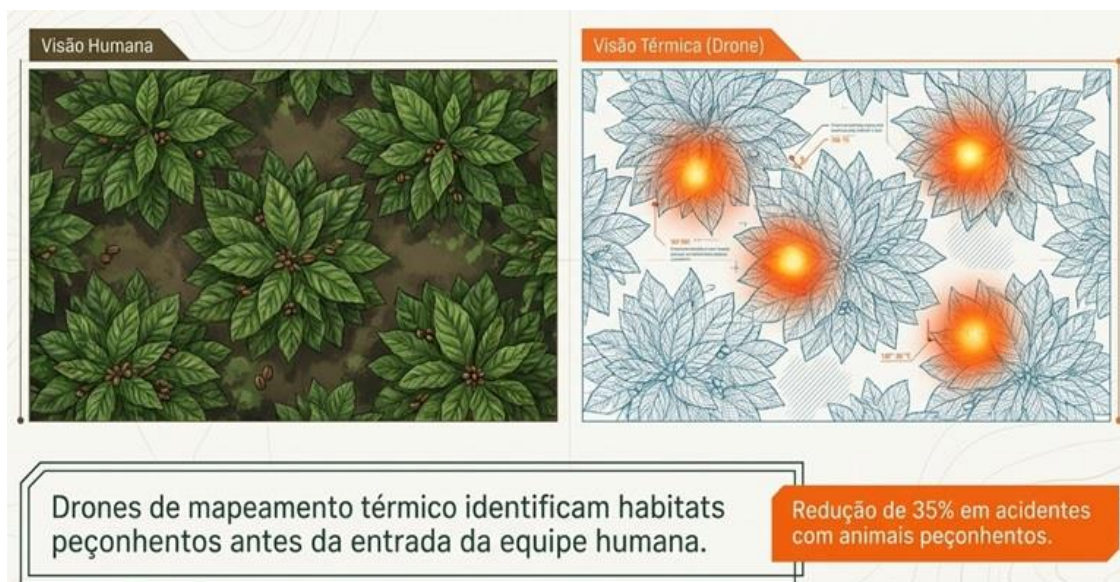


Figura 4. Tecnologias de agricultura de precisão voltadas à segurança do trabalhador rural. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Essas inovações, quando associadas a programas de capacitação e uso correto de EPIs, tendem a reduzir significativamente os índices de intoxicação. Embora as tecnologias digitais contribuam para a redução da exposição aos agentes químicos, outros fatores de risco permanecem presentes no ambiente de trabalho rural. Entre esses fatores, destacam-se os agentes biológicos associados à presença de animais peçonhentos e outros organismos potencialmente nocivos à saúde dos trabalhadores (Figura 5).



Figura 5. Principais riscos biológicos associados às atividades de pré-colheita na cafeicultura. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (ChatGPT).

A Figura 5 evidencia que, apesar dos avanços tecnológicos voltados à mitigação dos riscos químicos, os trabalhadores rurais continuam expostos a importantes riscos biológicos durante as atividades de pré-colheita. Destacam-se os acidentes envolvendo serpentes, escorpiões, aranhas e outros organismos potencialmente perigosos, cuja ocorrência tende a ser favorecida pelas condições ambientais características das áreas agrícolas. Estudos recentes indicam aumento desses acidentes em áreas agrícolas, frequentemente relacionados à alteração do habitat natural e à intensificação das atividades no

campo (FAO, 2025). Além dos impactos à saúde, esses eventos geram custos adicionais com atendimento médico e afastamento do trabalho.

Dessa forma, a fase de pré-colheita exige uma abordagem integrada de prevenção, combinando manejo seguro de insumos, adoção de tecnologias apropriadas, educação em saúde e estratégias de monitoramento ambiental, de modo a garantir melhores condições de trabalho e reduzir a vulnerabilidade dos trabalhadores rurais.

2.2. Colheita

Durante a colheita do café, os riscos ocupacionais estão fortemente associados às condições de trabalho, ao esforço físico intenso e à organização das atividades no campo. Um dos problemas recorrentes é o transporte inadequado de trabalhadores, que ainda representa parcela significativa dos acidentes rurais, frequentemente relacionado à utilização de veículos sem condições seguras ou fora das normas regulamentadoras (OIT, 2025). Outro aspecto crítico refere-se às cargas ergonômicas impostas aos trabalhadores, especialmente na colheita manual (Figura 6).

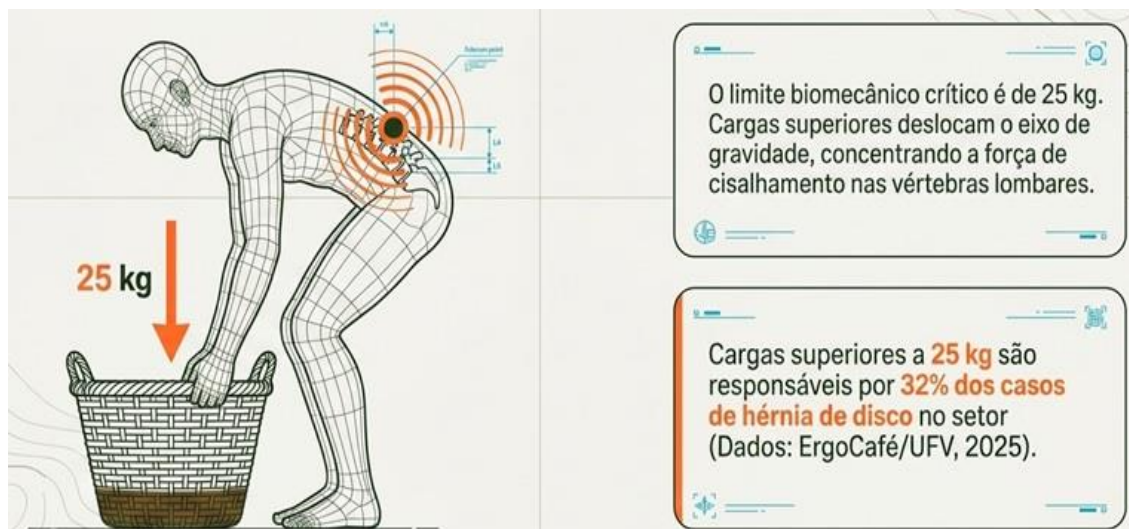


Figura 6. Sobrecargas biomecânicas e riscos ergonômicos na colheita do café. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

O uso de cestas com peso elevado, muitas vezes acima dos limites recomendados, contribui para o surgimento de distúrbios osteomusculares, como lombalgias e hérnias discais. Estudos indicam que o transporte de cargas

superiores a 25 kg está diretamente associado ao aumento desses agravos, sendo responsável por cerca de 32% dos casos de hérnia de disco entre trabalhadores da cafeicultura (ERGOCAFÉ/UFV, 2025). Além disso, a repetitividade dos movimentos, as posturas inadequadas e a longa jornada de trabalho intensificam o desgaste físico e aumentam a probabilidade de lesões.

No contexto da mecanização da colheita, embora haja redução do esforço físico, surgem novos riscos relacionados à operação de máquinas agrícolas, como acidentes por falhas mecânicas, ausência de dispositivos de proteção e baixa capacitação dos operadores (Baesso *et al.*, 2018).

Diante desse cenário, torna-se fundamental a adoção de medidas preventivas, como adequação do peso das cargas, melhoria das condições de transporte, uso de equipamentos auxiliares e capacitação dos trabalhadores. A incorporação de princípios ergonômicos às práticas de colheita é essencial para reduzir o desgaste físico, prevenir doenças ocupacionais e promover maior segurança e qualidade de vida no trabalho rural.

2.3. Pós-colheita

Na fase de pós-colheita, os riscos ocupacionais concentram-se principalmente nas operações de beneficiamento, secagem e armazenamento dos grãos, envolvendo o uso intensivo de máquinas e estruturas fixas. Os riscos mecânicos são particularmente relevantes, sobretudo quando equipamentos como descascadores, secadores e elevadores de grãos operam sem dispositivos adequados de proteção, aumentando significativamente a probabilidade de acidentes, como aprisionamentos, cortes e amputações (Baesso *et al.*, 2018; Vilela; Almeida; Mendes, 2003).

Outro ponto crítico refere-se às quedas em altura, frequentemente associadas a estruturas como moegas, silos e terreiros elevados que não dispõem de guarda-corpos, sinalização ou condições adequadas de acesso. Esses acidentes apresentam elevado potencial de gravidade, podendo resultar em lesões severas ou até óbitos, conforme apontam registros recentes em unidades de beneficiamento de café (CEREST, 2025).

Com base nos riscos ocupacionais identificados nas etapas de pré-colheita, colheita e pós-colheita, propõe-se uma matriz diagnóstica destinada a sistematizar o perfil de risco ao longo da cadeia produtiva da cafeicultura. Essa ferramenta permite organizar, de forma integrada, os principais perigos associados a cada etapa, desde o manejo no campo até o processamento pós-colheita, bem como os respectivos níveis de exposição e medidas preventivas recomendadas. Ao oferecer uma visão estruturada e comparativa, a matriz contribui para o planejamento de ações mais eficazes de segurança do trabalho, subsidiando a tomada de decisão e fortalecendo a gestão de riscos no ambiente produtivo (Figura 8).

Fase	Perigo Principal	Sistema Corporal Afetado	Gravidade
Pré-Colheita	Intoxicação (Organofosforados) / Peçonhentos	Sistema Neuromuscular / Sistêmico	Crítico
Colheita	Sobrecarga Ergonômica (>25kg)	Coluna Lombar (Hérnia de Disco)	Alto
Pós-Colheita	Esmagamento Mecânico / Quedas	Membros Superiores / Trauma Múltiplo	Crítico

Figura 8. Matriz diagnóstica dos riscos ocupacionais na cadeia produtiva do café. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A análise da Figura 8 evidencia que os riscos ocupacionais na cafeicultura apresentam natureza multifatorial e variam conforme a etapa produtiva considerada. Enquanto a pré-colheita concentra maior exposição a agentes químicos e biológicos, a colheita está associada principalmente a sobrecargas ergonômicas e acidentes relacionados ao transporte de trabalhadores. Já na pós-colheita, predominam os riscos mecânicos, quedas em altura e a exposição a poeiras e condições térmicas adversas. Esse panorama reforça a necessidade de estratégias preventivas específicas para cada fase do processo produtivo,

incluindo a adoção adequada de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs), tema abordado na seção seguinte.

3. Equipamentos de Proteção Individual (EPIs)

Para garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores rurais, especialmente na cafeicultura, é indispensável o uso adequado de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs), cuja finalidade é reduzir a exposição a riscos físicos, químicos, biológicos e ambientais presentes nas diversas etapas do processo produtivo. A literatura destaca que a não utilização ou o uso incorreto desses equipamentos está diretamente associado ao aumento de acidentes e intoxicações no meio rural (OIT, 2025; WHO, 2025).

Entre os principais EPIs utilizados na cafeicultura, destacam-se as máscaras com filtro (PFF2 ou PFF3), que protegem contra a inalação de poeiras e aerossóis contendo agrotóxicos, os aventais impermeáveis, recomendados para o preparo e a aplicação de produtos químicos, e os macacões de manga longa, que reduzem a exposição a agentes mecânicos e à radiação solar. Complementarmente, as luvas de borracha nitrílica são indispensáveis na manipulação de defensivos agrícolas, por oferecerem elevada resistência química e proteção contra a absorção dérmica de substâncias tóxicas (Evangelista, 2023; WHO, 2025).

Adicionalmente, recomenda-se o uso de chapéu de aba larga ou boné do tipo árabe, que auxilia na proteção contra a radiação ultravioleta, especialmente em jornadas prolongadas sob exposição solar intensa. Os óculos de proteção são indispensáveis para evitar o contato de partículas e produtos químicos com os olhos, enquanto os protetores auriculares ou abafadores de ruído são fundamentais na operação de máquinas, reduzindo os riscos de perda auditiva induzida por níveis elevados de ruído (OIT, 2025) (Figura 9).

A Figura 9 sintetiza os principais Equipamentos de Proteção Individual recomendados para as atividades desenvolvidas na cafeicultura, evidenciando que a proteção do trabalhador depende da utilização integrada de diferentes dispositivos. A combinação adequada desses equipamentos reduz significativamente a exposição aos riscos químicos, físicos, biológicos e

mecânicos presentes nas operações de pré-colheita, colheita e pós-colheita, contribuindo para a prevenção de acidentes e doenças ocupacionais. Entretanto, a simples disponibilização dos EPIs não garante sua eficácia, tornando indispensáveis ações contínuas de capacitação, orientação e fiscalização quanto ao seu uso correto.



Figura 9. Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) recomendados para a mitigação dos riscos ocupacionais na cafeicultura. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (ChatGPT).

A Norma Regulamentadora nº 31 estabelece que é responsabilidade do empregador fornecer EPIs adequados, em perfeito estado de conservação e funcionamento, bem como orientar e capacitar os trabalhadores quanto ao seu uso correto (BRASIL, 2024). Nesse sentido, a eficácia dos EPIs está diretamente relacionada não apenas à sua disponibilidade, mas também à conscientização e ao treinamento contínuo dos trabalhadores, constituindo elemento essencial para a promoção de ambientes de trabalho mais seguros e saudáveis na cafeicultura.

4. Equipamentos de Proteção Coletiva (EPCs)

Além dos Equipamentos de Proteção Individual (EPIs), os Equipamentos de Proteção Coletiva (EPCs) desempenham papel fundamental na promoção da

segurança e da saúde no trabalho rural, especialmente na cafeicultura. Diferentemente dos EPIs, os EPCs atuam na fonte do risco ou no ambiente de trabalho, protegendo simultaneamente todos os trabalhadores e contribuindo para a redução sistêmica dos acidentes (OIT, 2025).

Além das estruturas de sinalização e isolamento, os EPCs abrangem um conjunto diversificado de dispositivos, sistemas e adaptações destinadas a eliminar ou minimizar os riscos diretamente no ambiente de trabalho. Na cafeicultura, esses equipamentos assumem especial relevância em áreas de circulação de máquinas, unidades de beneficiamento, terreiros, secadores, armazéns e estruturas destinadas ao processamento pós-colheita, onde a presença de superfícies escorregadias, desníveis, partes móveis de equipamentos e trabalhos em altura elevam significativamente a probabilidade de acidentes. Diferentemente dos EPIs, cuja eficácia depende da utilização individual e correta por parte do trabalhador, os EPCs oferecem proteção contínua e coletiva, reduzindo a exposição ao risco independentemente da ação individual. Dessa forma, sua implementação constitui uma das estratégias mais eficazes para a prevenção de acidentes ocupacionais, contribuindo para a construção de ambientes laborais mais seguros, organizados e em conformidade com as normas de segurança do trabalho (BRASIL, 2024; OIT, 2025) (Figura 10).

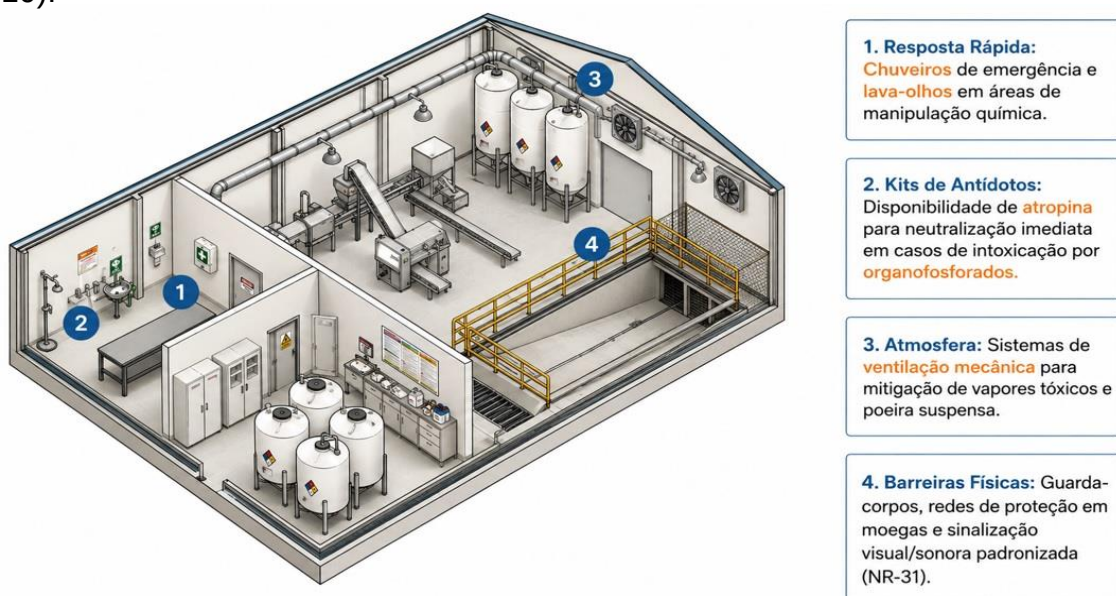


Figura 10. Estruturas de proteção física para prevenção de quedas em instalações de pós-colheita. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A Figura 10 evidencia que os Equipamentos de Proteção Coletiva constituem uma das principais estratégias de prevenção de acidentes no ambiente rural, atuando diretamente na eliminação ou na redução dos riscos presentes nos locais de trabalho. Diferentemente dos EPIs, cuja eficácia depende da utilização individual pelo trabalhador, os EPCs oferecem proteção simultânea a todos os indivíduos expostos, promovendo maior segurança nas atividades desenvolvidas ao longo da cadeia produtiva do café. Na cafeicultura, esses dispositivos são particularmente importantes em áreas de beneficiamento, secagem, armazenamento e circulação de máquinas, onde a presença de desníveis, partes móveis de equipamentos, superfícies escorregadias e operações em altura aumenta a probabilidade de acidentes. Dessa forma, a adoção de sistemas de sinalização, barreiras físicas, dispositivos de proteção mecânica e estruturas de prevenção de quedas contribui significativamente para a redução dos riscos ocupacionais e para a consolidação de ambientes de trabalho mais seguros e organizados (Fundacentro, 2021; Brasil, 2024).

Entre os principais EPCs, destaca-se a sinalização de segurança, composta por placas, cores padronizadas e avisos informativos, como “Perigo: Agrotóxico” e “Cuidado: Piso Escorregadio”, que têm a função de alertar e orientar os trabalhadores quanto aos riscos presentes no ambiente laboral. A correta sinalização é essencial para a prevenção de acidentes e deve estar em conformidade com as normas técnicas vigentes (BRASIL, 2024).

Outro componente relevante refere-se às proteções físicas, como guarda-corpos, corrimãos e redes de proteção, amplamente recomendados em estruturas elevadas, como moegas, silos e plataformas de trabalho. Esses dispositivos são fundamentais para a prevenção de quedas, um dos acidentes mais frequentes e graves na fase de pós-colheita (CEREST, 2025).

No contexto de exposição a agentes químicos, a instalação de chuveiros de emergência e lava-olhos é indispensável, permitindo uma resposta imediata em casos de contato acidental com substâncias tóxicas e reduzindo significativamente os danos à saúde dos trabalhadores. Da mesma forma, a ventilação adequada em ambientes fechados, como galpões de armazenamento e unidades de beneficiamento, constitui importante medida de proteção coletiva, contribuindo para a redução da concentração de poeiras e vapores

potencialmente nocivos, melhorando a qualidade do ar e prevenindo doenças respiratórias ocupacionais. Em conjunto, esses dispositivos demonstram que a prevenção de acidentes e agravos à saúde deve priorizar intervenções no próprio ambiente de trabalho, reduzindo a exposição aos riscos antes mesmo da adoção de medidas individuais de proteção (OIT, 2025; WHO, 2025).

A integração entre medidas de proteção individual e coletiva representa a base da prevenção de acidentes na cafeicultura, conforme exemplificado na Figura 11. Os exemplos apresentados evidenciam que a gestão da segurança ocupacional na cafeicultura deve priorizar a combinação de medidas preventivas de caráter coletivo e individual, buscando reduzir os riscos diretamente na fonte e complementar a proteção dos trabalhadores durante a execução das atividades produtivas.

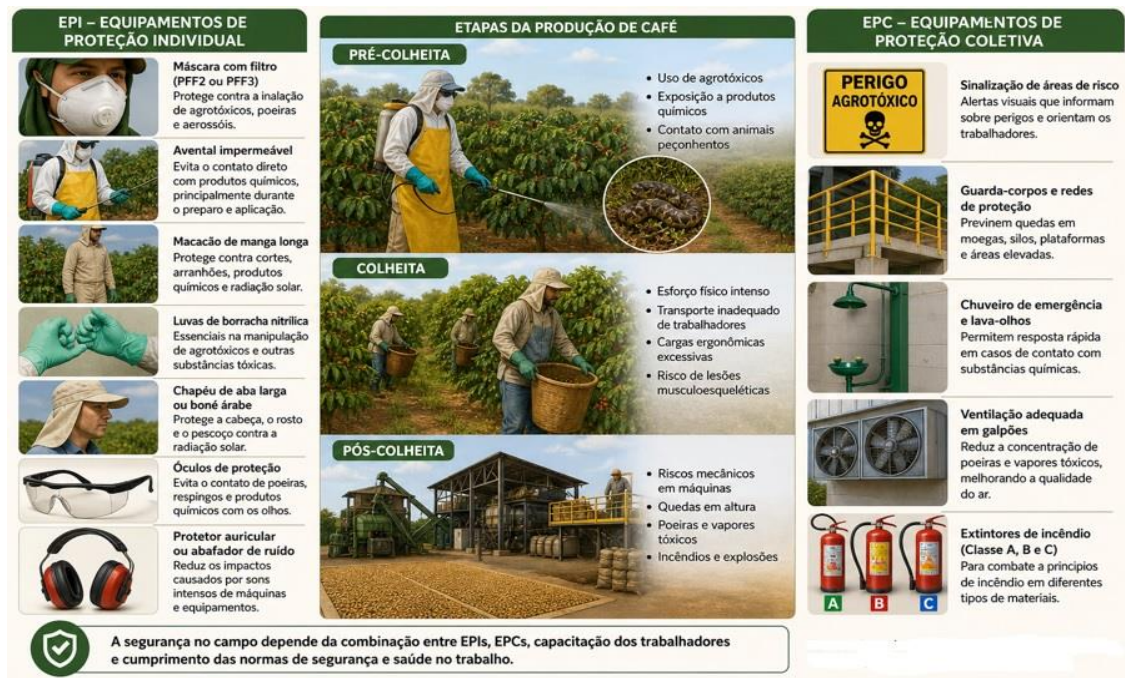


Figura 11. Segurança do trabalho na cafeicultura: exemplos de EPIs e EPCs utilizados nas diferentes etapas da produção de café. Fonte: adaptado da NR-31 (BRASIL, 2024), por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (ChatGPT).

A Figura 11 apresenta exemplos de Equipamentos de Proteção Individual e Coletiva aplicáveis às diferentes operações da cafeicultura, evidenciando a complementaridade entre as medidas de proteção. Enquanto os EPIs atuam diretamente sobre o trabalhador, os EPCs promovem a redução dos riscos na

fonte ou no ambiente de trabalho, proporcionando proteção simultânea a todos os indivíduos expostos. A integração dessas estratégias constitui um dos pilares da gestão preventiva da segurança ocupacional, contribuindo para a redução da ocorrência de acidentes e para a promoção de ambientes produtivos mais seguros e saudáveis.

Adicionalmente, os sistemas de combate a incêndios são essenciais para a segurança das instalações rurais, destacando-se o uso de extintores portáteis das classes A (materiais sólidos), B (líquidos inflamáveis) e C (equipamentos elétricos). Esses dispositivos devem estar devidamente sinalizados, acessíveis e dentro do prazo de validade, conforme as normas de segurança contra incêndio (BRASIL, 2024).

Dessa forma, a adoção integrada de EPCs, aliada ao uso correto de EPIs e à capacitação dos trabalhadores, constitui uma estratégia eficaz para a redução de riscos ocupacionais, promovendo ambientes de trabalho mais seguros, organizados e em conformidade com a legislação vigente na cafeicultura.

Embora os EPIs e EPCs sejam fundamentais para a prevenção de acidentes e para a redução da exposição ocupacional aos diversos riscos presentes na cafeicultura, algumas atividades demandam medidas complementares de segurança devido ao seu elevado potencial de impacto à saúde humana e ao meio ambiente. Entre elas, destacam-se as operações relacionadas ao preparo, manuseio, aplicação e armazenamento de agrotóxicos, consideradas uma das principais fontes de exposição química no trabalho rural. Nesse contexto, além da adoção dos equipamentos de proteção adequados, torna-se necessária a implementação de procedimentos específicos de segurança capazes de minimizar os riscos de intoxicação e contaminação ambiental.

5. Medidas de segurança adicionais para o trabalho com agrotóxicos

O uso de agrotóxicos no Brasil remonta aos anos da década de 1940, intensificando-se a partir do final dos anos 1960, em decorrência das políticas de modernização agrícola associadas à chamada Revolução Verde, que

promoveram ampla difusão desses insumos nos sistemas produtivos (Dutra; Souza, 2017). Nas últimas décadas, os agrotóxicos passaram a ocupar papel central na agricultura brasileira, sendo amplamente utilizados com o objetivo de elevar a produtividade e aumentar a rentabilidade das atividades agropecuárias (Buralli *et al.*, 2021).

Dados recentes indicam uma expansão significativa desse mercado. Entre 2019 e 2022, aproximadamente dois mil novos produtos foram registrados para comercialização no país, conforme informações do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Brasil, 2023). Essa diversidade reflete a complexidade da classificação dos agrotóxicos, que pode ocorrer quanto à toxicidade, ao organismo-alvo e ao grupo químico. Ademais, seu uso não se restringe à agricultura empresarial, sendo também amplamente observado na agricultura familiar, ainda que em diferentes escalas (Carvalho; Alonzo, 2022).

Do ponto de vista funcional, os agrotóxicos classificam-se em inseticidas, fungicidas, herbicidas e reguladores de crescimento, sendo utilizados no controle de organismos prejudiciais às culturas agrícolas (Braibante; Zappe, 2012; Bohner *et al.*, 2013). Apesar de sua importância agrônômica, a insuficiência histórica das medidas de controle e mitigação dos impactos à saúde humana e ao meio ambiente tem resultado em riscos significativos para a população exposta (Assunção, 2019).

Além do uso adequado de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) e Equipamentos de Proteção Coletiva (EPCs), é indispensável a adoção de medidas complementares de segurança, especialmente a capacitação prevista na Norma Regulamentadora nº 31. Os treinamentos devem contemplar o manuseio correto dos produtos, a interpretação de rótulos e bulas, o reconhecimento de sintomas de intoxicação e os procedimentos de primeiros socorros, contribuindo para reduzir erros operacionais e fortalecer a cultura de segurança no meio rural (Figura 12).

Conforme ilustrado na Figura 12, a preparação para situações de emergência constitui componente indispensável dos programas de segurança envolvendo agrotóxicos. Nesse contexto, recomenda-se a disponibilidade de kits de emergência em locais de fácil acesso, contendo materiais de primeiros socorros e, quando aplicável, antídotos específicos. No caso de intoxicações por

organofosforados, por exemplo, a atropina é amplamente utilizada como agente terapêutico, sendo fundamental sua administração precoce para minimizar os efeitos tóxicos (WHO, 2025).



Figura 12. Principais medidas preventivas de segurança para o manuseio e a aplicação de agrotóxicos na cafeicultura. Fonte: elaborada por Maurício Novaes com auxílio de IA (ChatGPT).

A higienização adequada dos EPIs após o uso também constitui prática indispensável. Recomenda-se que esses equipamentos sejam lavados separadamente, utilizando água e sabão neutro, evitando o uso de solventes que possam comprometer sua integridade. Após a limpeza, os EPIs devem ser armazenados em locais exclusivos, ventilados e protegidos, afastados de roupas comuns e utensílios domésticos, prevenindo a contaminação cruzada.

Adicionalmente, é fundamental adotar boas práticas operacionais, como o respeito às condições climáticas durante a aplicação (velocidade do vento, temperatura e umidade), o cumprimento do período de carência e do intervalo de reentrada nas áreas tratadas, bem como a correta destinação das embalagens vazias, conforme a legislação ambiental vigente. Tais medidas

contribuem não apenas para a segurança do trabalhador, mas também para a proteção do meio ambiente e da saúde pública.

Dessa forma, a adoção integrada de práticas preventivas, aliada à capacitação dos trabalhadores e ao uso responsável dos insumos agrícolas, constitui elemento central para a construção de sistemas produtivos mais seguros, eficientes e alinhados aos princípios da sustentabilidade na cafeicultura.

A evolução das estratégias de segurança do trabalho tem sido acompanhada pela incorporação de ferramentas tecnológicas capazes de ampliar a eficiência das ações preventivas. Enquanto os modelos tradicionais de gestão baseiam-se predominantemente em registros impressos, inspeções presenciais e procedimentos manuais de controle, as tecnologias digitais permitem monitoramento em tempo real, rastreabilidade das operações e maior agilidade na identificação de situações de risco. Essa transformação tem contribuído para o fortalecimento da cultura de prevenção no meio rural, tornando os processos de gestão mais precisos, integrados e proativos (Figura 13).

Defesa Tradicional (Reativa)	Tipo de Risco	Defesa Tecnológica 2025 (Preditiva)
Inspeção manual diária.	Falha de Maquinário	Monitoramento constante via sensores IoT. Queda de 20% em falhas operacionais.
Uso reativo de soro antiofídico.	Animais Peçonhentos	Mapeamento térmico prévio com Drones. Redução de 35% nos acidentes.
Laudos físicos desatualizados.	Auditoria de Segurança	Auditorias automatizadas e laudos digitais. Aceleração da conformidade normativa.

Figura 13. Evolução das estratégias de prevenção de riscos: da abordagem reativa à gestão preditiva. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A Figura 13 ilustra a transição dos modelos convencionais de gestão da segurança para sistemas digitais de monitoramento e controle. Enquanto as

abordagens analógicas apresentam limitações quanto ao registro de informações, à comunicação e à rapidez na tomada de decisão, as tecnologias digitais permitem integrar dados, automatizar processos e emitir alertas preventivos.

Na cafeicultura, essas ferramentas auxiliam no monitoramento da aplicação de agrotóxicos, do uso de EPIs, da capacitação dos trabalhadores e do cumprimento das exigências legais, fortalecendo a prevenção de acidentes e a gestão da saúde ocupacional. Entre suas aplicações, destaca-se o acompanhamento da operação de máquinas e equipamentos agrícolas, uma das atividades de maior risco no meio rural.

6. Prevenção de acidentes com máquinas

A prevenção de acidentes envolvendo máquinas agrícolas é fundamental para assegurar a integridade física dos trabalhadores e a continuidade das atividades no campo. Nesse contexto, a adoção de práticas preventivas simples, porém eficazes, deve fazer parte da rotina operacional, especialmente diante da elevada incidência de acidentes relacionados ao uso de equipamentos no meio rural (Baesso *et al.*, 2018; Vilela; Almeida; Mendes, 2003).

Entre essas práticas, destaca-se o uso de dispositivos de segurança, como travas em tratores e colheitadeiras, que impedem acionamentos involuntários e reduzem significativamente o risco de ocorrências graves, contribuindo para a mitigação de riscos ocupacionais (Baesso *et al.*, 2018; OIT, 2025).

Adicionalmente, a realização de inspeções diárias nos equipamentos é indispensável. A verificação de componentes como freios, pneus, sistemas hidráulicos e possíveis vazamentos permite a identificação precoce de falhas, evitando acidentes e prejuízos operacionais, conforme recomendado em diretrizes de segurança no trabalho agrícola (CEREST, 2025; OIT, 2025) (Figura 14).

A Figura 14 sintetiza algumas das principais medidas preventivas relacionadas à operação segura de máquinas agrícolas, evidenciando a importância da manutenção periódica, da inspeção preventiva e da utilização de dispositivos de segurança. A adoção dessas práticas contribui para a redução

de falhas mecânicas, minimiza a ocorrência de acidentes e promove maior proteção aos trabalhadores envolvidos nas atividades mecanizadas da cafeicultura.



Figura 14. Principais medidas preventivas para a operação segura de máquinas agrícolas na cafeicultura. Fonte: elaborada por Maurício Novaes com auxílio de IA (ChatGPT).

Outro aspecto relevante refere-se à utilização de sinalização sonora e visual em máquinas em funcionamento. Esses mecanismos contribuem para alertar os trabalhadores no entorno, favorecendo a comunicação no ambiente de trabalho e reduzindo a probabilidade de colisões e outros incidentes (Baesso *et al.*, 2018; Vilela; Almeida; Mendes, 2003).

Por fim, ressalta-se a importância da capacitação dos operadores e do cumprimento rigoroso das normas de segurança, assegurando que o uso das máquinas ocorra de forma consciente, responsável e alinhada aos princípios da prevenção (Figura 15). Tais medidas estão em consonância com recomendações internacionais voltadas à promoção da saúde e segurança no trabalho rural (FAO, 2025; OIT, 2025).

A Figura 15 evidencia que a segurança do trabalho não depende exclusivamente de equipamentos, normas ou tecnologias, mas também de fatores humanos relacionados ao conhecimento, à percepção de risco e ao bem-

estar dos trabalhadores. A capacitação contínua, a adoção de comportamentos seguros e a promoção da saúde física e mental contribuem para a redução de falhas operacionais, fortalecem a tomada de decisões em situações de risco e favorecem a construção de uma cultura preventiva no ambiente rural. Nesse contexto, a proteção dos trabalhadores deve contemplar não apenas os riscos mecânicos e químicos, mas também outros perigos presentes nas atividades agrícolas, como aqueles associados ao contato com animais peçonhentos.

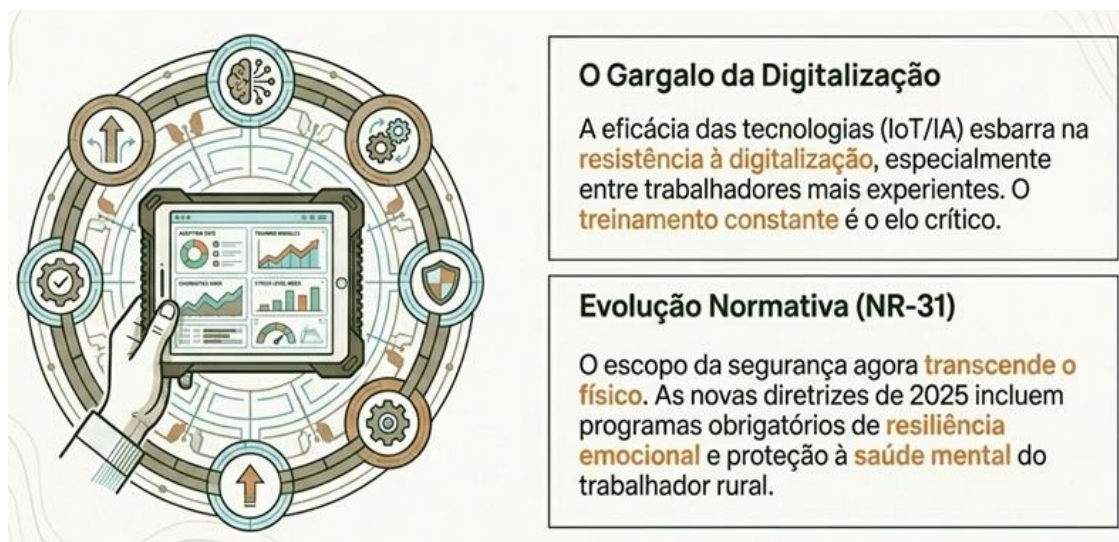


Figura 15. Fatores humanos na prevenção de acidentes: capacitação, comportamento seguro e saúde ocupacional. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

7. Proteção contra animais peçonhentos

A presença de animais peçonhentos no ambiente rural representa um risco significativo para os trabalhadores, especialmente em atividades realizadas em áreas abertas, como lavouras, pastagens e áreas de mata. Acidentes com serpentes, escorpiões, aranhas e himenópteros (abelhas e vespas) configuram um importante problema de saúde pública no Brasil, exigindo a adoção de medidas preventivas sistemáticas no cotidiano das atividades rurais (BRASIL, 2019; WHO, 2025). Nesse contexto, o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) é uma das principais estratégias de prevenção. Botas de cano alto, perneiras, luvas e vestimentas adequadas funcionam como barreiras

físicas, reduzindo significativamente o risco de picadas e ferroadas durante o trabalho (OIT, 2025; BRASIL, 2019) (Figura 16).



Figura 16. Principais medidas preventivas para proteção dos trabalhadores contra animais peçonhentos no meio rural. Fonte: elaborada por Maurício Novaes com auxílio de IA (ChatGPT).

A Figura 16 evidencia que a prevenção de acidentes envolvendo animais peçonhentos depende da combinação entre o uso adequado de equipamentos de proteção, a adoção de práticas preventivas no ambiente de trabalho e a conscientização dos trabalhadores quanto aos riscos existentes. Essas medidas reduzem significativamente a probabilidade de contato com serpentes, escorpiões, aranhas e outros organismos potencialmente perigosos, contribuindo para a proteção da saúde e para a segurança das atividades desenvolvidas na cafeicultura.

Além disso, recomenda-se a inspeção prévia das áreas de trabalho antes do início das atividades. A verificação de locais propícios ao abrigo desses animais, como entulhos, troncos caídos, pedras, vegetação densa e acúmulo de materiais orgânicos, contribui para minimizar o risco de encontros acidentais (FUNASA, 2010; BRASIL, 2019). A adoção de práticas de manejo ambiental, como a limpeza periódica do entorno e a organização dos espaços produtivos, também é essencial para reduzir a atratividade desses ambientes para animais peçonhentos.

Paralelamente às medidas de proteção física e ao manejo adequado do ambiente de trabalho, a educação e a capacitação dos trabalhadores rurais também desempenham papel fundamental na prevenção de acidentes. O conhecimento sobre identificação de espécies, comportamento dos animais peçonhentos e procedimentos corretos em caso de acidente é fundamental para uma resposta rápida e eficaz, evitando práticas inadequadas que possam agravar o quadro clínico (OIT, 2025; WHO, 2025).

Adicionalmente, é imprescindível garantir o acesso rápido ao atendimento de saúde, especialmente ao soro antiofídico em regiões de maior risco. A disponibilidade desse tratamento em unidades de saúde próximas, aliada à agilidade no atendimento, é determinante para a redução da gravidade dos casos e para o aumento das chances de recuperação do trabalhador (BRASIL, 2019; WHO, 2025).

Paralelamente, o conhecimento sobre identificação de espécies, comportamento dos animais peçonhentos e procedimentos corretos em caso de acidente é essencial para uma resposta rápida e eficaz, evitando condutas inadequadas que possam agravar o quadro clínico e comprometendo a efetividade do atendimento especializado (BRASIL, 2019; WHO, 2025).

Enfim, destaca-se que a prevenção de acidentes com animais peçonhentos deve ser compreendida como parte integrante das políticas de saúde e segurança no trabalho rural, articulando ações de educação, manejo ambiental, uso de EPIs e fortalecimento da rede de atenção à saúde, em consonância com diretrizes nacionais e internacionais voltadas à proteção do trabalhador (OIT, 2025; WHO, 2025). A integração dessas diferentes medidas evidencia a necessidade de abordagens preventivas cada vez mais abrangentes, capazes de combinar capacitação, gestão de riscos e inovação tecnológica na promoção de ambientes de trabalho mais seguros.

8. Estratégias de prevenção integrada

Nos últimos anos, a incorporação de novas tecnologias às atividades agrícolas tem desempenhado um papel estratégico na promoção da segurança no campo. Em 2025, observa-se o avanço de soluções inovadoras que

contribuem diretamente para a prevenção de acidentes, ao integrar monitoramento em tempo real, automação e análise de dados no ambiente produtivo (FAO, 2025; OIT, 2025).

Entre essas inovações, destacam-se os sensores baseados em Internet das Coisas (IoT), instalados em máquinas agrícolas como tratores e colhedoras. Esses dispositivos são capazes de monitorar continuamente o desempenho dos equipamentos, identificando falhas mecânicas, superaquecimento, vibrações anormais e outros indicadores de risco com alto nível de precisão. A detecção precoce dessas anomalias permite intervenções preventivas, reduzindo significativamente a probabilidade de acidentes e aumentando a eficiência operacional (FAO, 2025).

Outra tecnologia relevante é o uso de *drones* no monitoramento das áreas de trabalho. Esses equipamentos possibilitam a inspeção remota de grandes extensões de terra, auxiliando na identificação de riscos como terrenos irregulares, presença de animais peçonhentos, focos de incêndio e obstáculos não visíveis ao nível do solo. Dessa forma, os *drones* reduzem a necessidade de exposição direta dos trabalhadores a situações potencialmente perigosas, promovendo um ambiente laboral mais seguro (OIT, 2025; WHO, 2025).

Além disso, sistemas digitais de gestão e aplicativos móveis têm sido utilizados para o registro e análise de incidentes, rastreamento de atividades e disseminação de alertas em tempo real. Essas ferramentas favorecem a tomada de decisão rápida e baseada em dados, fortalecendo uma cultura de prevenção no meio rural (FAO, 2025) (Figura 17).

A Figura 17 ilustra a integração de diferentes tecnologias digitais voltadas à prevenção de riscos ocupacionais no meio rural, evidenciando como sensores inteligentes, sistemas de monitoramento, *drones* e plataformas digitais podem atuar de forma complementar na gestão da segurança do trabalho. Essa abordagem integrada permite identificar situações de risco com maior rapidez, ampliar a capacidade de resposta preventiva e apoiar a tomada de decisão baseada em dados, contribuindo para ambientes produtivos mais seguros, eficientes e sustentáveis.



Figura 17. Integração de tecnologias digitais para prevenção de riscos ocupacionais na cafeicultura. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Outro avanço importante refere-se à adoção de tecnologias de automação e máquinas semiautônomas, que reduzem a necessidade de intervenção humana em operações de maior risco. Aliadas a programas de capacitação contínua, essas inovações ampliam a segurança do trabalho, promovem maior eficiência operacional e contribuem para a construção de sistemas produtivos mais sustentáveis. Dessa forma, a integração entre tecnologias digitais, gestão preventiva e qualificação dos trabalhadores consolida-se como uma das principais estratégias para a redução dos riscos ocupacionais na cafeicultura contemporânea (OIT, 2025).

Por fim, ressalta-se que a efetividade dessas estratégias depende da integração entre tecnologia, capacitação dos trabalhadores e gestão adequada dos riscos. A prevenção integrada, portanto, não se limita ao uso de equipamentos modernos, mas envolve uma abordagem sistêmica que articula inovação, educação e políticas de segurança, alinhadas às diretrizes internacionais de saúde e segurança no trabalho rural (FAO, 2025; OIT, 2025). Entre as abordagens que incorporam esses princípios de forma integrada, destaca-se a cafeicultura agroecológica.

9. Cafeicultura agroecológica e contribuições para a segurança no trabalho

A cafeicultura agroecológica tem se consolidado como uma abordagem produtiva que integra princípios ecológicos, sociais e econômicos, promovendo não apenas a sustentabilidade ambiental, mas também melhorias significativas na segurança e saúde dos trabalhadores rurais. Ao reduzir a dependência de insumos químicos e priorizar práticas conservacionistas, esse modelo contribui para a diminuição dos riscos ocupacionais associados à agricultura convencional (Lobell; Burke, 2013; Silva; Souza, 2021).

Sob a perspectiva da agroecologia, a sustentabilidade dos sistemas produtivos resulta da integração entre processos ecológicos, diversidade biológica, autonomia dos agricultores e valorização dos conhecimentos locais. Segundo Altieri (2012), agroecossistemas diversificados tendem a apresentar maior estabilidade ecológica, menor dependência de insumos externos e maior capacidade de autorregulação frente a estresses ambientais e biológicos.

De forma complementar, Gliessman (2015) destaca que a transição agroecológica promove a substituição gradual de práticas dependentes de insumos sintéticos por estratégias baseadas nos processos ecológicos naturais, contribuindo para a conservação dos recursos naturais e para a melhoria da qualidade de vida das comunidades rurais. Nesse contexto, a segurança e a saúde dos trabalhadores passam a ser compreendidas como componentes indissociáveis da sustentabilidade, uma vez que sistemas produtivos mais equilibrados tendem a reduzir a exposição a agentes químicos, minimizar situações de risco e favorecer condições laborais mais seguras e resilientes (Leff, 2002; Caporal; Costabeber, 2004) (Figura 18).

Além da redução da exposição aos agrotóxicos, a cafeicultura agroecológica promove benefícios adicionais relacionados à organização do sistema produtivo e às condições de trabalho no campo. Nesse contexto, a diversificação produtiva e a adoção de sistemas agroflorestais contribuem para a melhoria do ambiente laboral, favorecendo simultaneamente a sustentabilidade ecológica e a proteção da saúde dos trabalhadores.

A presença do componente arbóreo proporciona sombreamento natural, reduzindo a incidência direta da radiação solar, atenuando as temperaturas

extremas e aumentando a umidade relativa do ar. Essas modificações microclimáticas contribuem para a redução do estresse térmico, do risco de desidratação e da exaustão por calor, promovendo maior conforto ocupacional durante a realização das atividades agrícolas (Altieri, 2012; Gliessman, 2015; Cohen *et al.*, 2013; FAO, 2025).

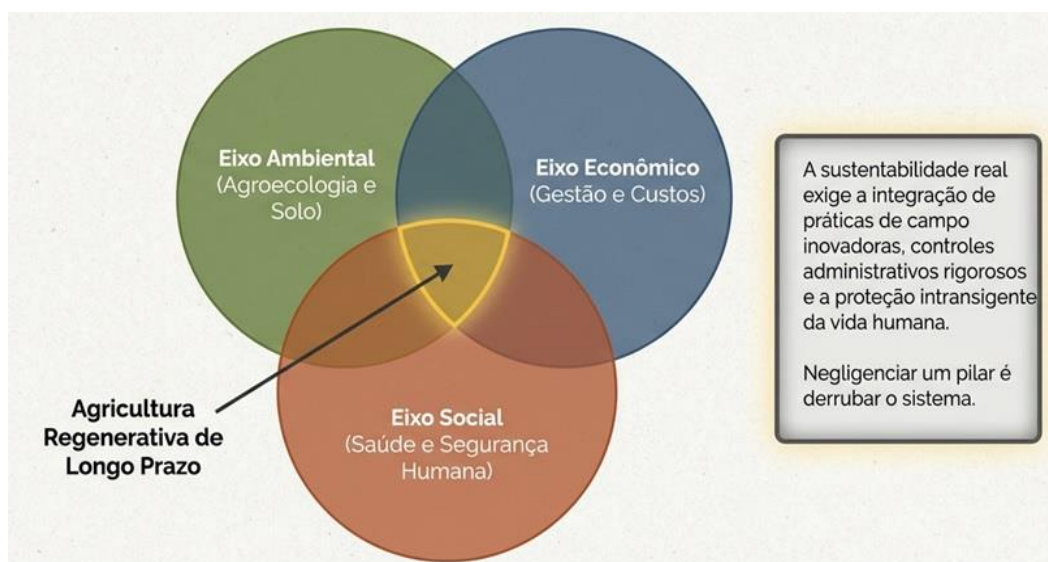


Figura 18. Contribuições da cafeicultura agroecológica para a segurança, a saúde e a sustentabilidade no trabalho rural. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Adicionalmente, os sistemas agroflorestais favorecem o equilíbrio ecológico, ampliando a biodiversidade funcional, reduzindo a incidência de pragas e doenças e, consequentemente, diminuindo a necessidade de intervenções químicas. Dessa forma, a agroecologia contribui para a construção de ambientes de trabalho mais seguros, resilientes e alinhados aos princípios da sustentabilidade (Figura 19).

A Figura 19 demonstra que os benefícios da agroecologia vão além da simples substituição de insumos químicos, abrangendo aspectos relacionados à qualidade ambiental, à saúde dos trabalhadores, à conservação dos recursos naturais e à resiliência dos sistemas produtivos. Essa abordagem integrada contribui para a redução dos riscos ocupacionais e fortalece a construção de sistemas agrícolas mais equilibrados e sustentáveis.

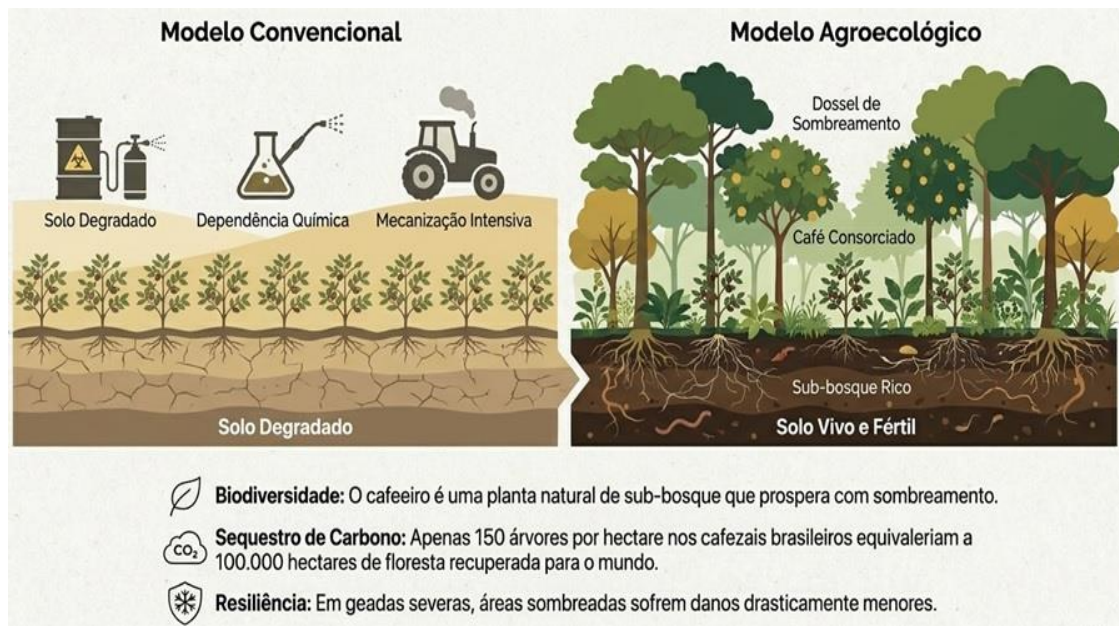


Figura 19. Benefícios da cafeicultura agroecológica para a saúde, a segurança e a sustentabilidade do trabalho rural. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Outro aspecto importante diz respeito à melhoria das condições do solo. Práticas como cobertura vegetal, rotação de culturas e uso de matéria orgânica favorecem a fertilidade, a estabilidade estrutural e a capacidade de retenção de água do solo, reduzindo processos erosivos e riscos associados a terrenos instáveis. Além disso, solos mais saudáveis favorecem operações agrícolas mais eficientes, contribuindo para a redução do esforço físico excessivo e para melhores condições de trabalho (Silva; Souza, 2021).

A cafeicultura agroecológica também estimula a organização social e a capacitação dos produtores e trabalhadores, fortalecendo a cultura de prevenção no meio rural. A troca de conhecimentos, a valorização dos saberes locais e a educação ambiental favorecem a adoção de práticas mais conscientes, seguras e alinhadas aos princípios da sustentabilidade (FAO, 2025).

Por fim, destaca-se que os sistemas agroecológicos estão alinhados às diretrizes globais de desenvolvimento sustentável, integrando proteção ambiental, saúde humana e segurança do trabalho. Nesse contexto, a agroecologia contribui para a sustentabilidade da produção cafeeira e para a

mitigação dos riscos ocupacionais, promovendo melhores condições de trabalho no meio rural (Lobell; Burke, 2013; FAO, 2025).

Esses benefícios tornam-se mais evidentes quando comparados aos sistemas convencionais, marcados pela elevada dependência de insumos externos, simplificação dos agroecossistemas e maior exposição dos trabalhadores a riscos químicos, físicos e ambientais. Em contrapartida, os sistemas agroecológicos integram produção, conservação ambiental e bem-estar humano, promovendo maior equilíbrio entre as dimensões ecológica, social e econômica da cafeicultura (Figura 20).

	Agricultura Convencional/Extrativista	Agricultura Agroecológica/Integrada
Eixo Ambiental (Solo)	Suporte inerte dependente de química	Organismo vivo nutrido por adubação verde e biodiversidade.
Eixo Econômico (Gestão)	Foco no volume absoluto e intuição	Rastreabilidade, cálculo de COE e foco no Lucro Líquido.
Eixo Social (Humano)	Trabalhador vulnerável, doente e sem instrução	Profissional treinado, protegido e agente de segurança.

Figura 20. Contrastes entre sistemas convencionais e agroecológicos quanto à sustentabilidade e à segurança do trabalho. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A Figura 20 evidencia o contraste entre modelos produtivos baseados na intensificação do uso de insumos e aqueles fundamentados nos princípios da agroecologia. Enquanto os sistemas convencionais tendem a concentrar riscos ocupacionais e impactos ambientais, os sistemas agroecológicos favorecem a diversificação produtiva, a redução da dependência química, a conservação dos recursos naturais e a melhoria das condições de trabalho. Essa abordagem integrada reforça o potencial da agroecologia como estratégia de promoção simultânea da sustentabilidade e da segurança ocupacional na cafeicultura.

A análise dos diferentes riscos ocupacionais discutidos ao longo deste capítulo demonstra que a segurança do trabalho na cafeicultura envolve

múltiplos fatores inter-relacionados, abrangendo aspectos físicos, químicos, biológicos, ergonômicos, organizacionais e tecnológicos. Diante dessa complexidade, torna-se necessário dispor de instrumentos que permitam sistematizar e integrar as informações referentes aos perigos presentes nas distintas etapas da cadeia produtiva. Essa perspectiva está alinhada às recomendações contemporâneas de gestão integrada da saúde e segurança no trabalho, que enfatizam a identificação preventiva dos riscos e a adoção de medidas de controle compatíveis com as especificidades de cada atividade produtiva (BRASIL, 2024; FAO, 2025; OIT, 2025).

Nesse contexto, propõe-se a construção de uma matriz diagnóstica que sintetiza o perfil de risco por fase produtiva da cafeicultura. Essa ferramenta permite organizar, de forma integrada, os principais perigos associados a cada etapa, desde o manejo no campo até o processamento pós-colheita, bem como os respectivos níveis de exposição e medidas preventivas recomendadas. Ao oferecer uma visão estruturada e comparativa, a matriz contribui para o planejamento de ações mais eficazes de segurança do trabalho, subsidiando a tomada de decisão e fortalecendo a gestão de riscos no ambiente produtivo.

10. Considerações

A segurança nas lavouras de café resulta da articulação entre múltiplos fatores técnicos, humanos e organizacionais. O uso adequado de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs), a implantação de Equipamentos de Proteção Coletiva (EPCs) e a adoção de boas práticas de gestão constituem a base para a prevenção de acidentes. Quando integrados a rotinas sistemáticas de inspeção, manutenção de máquinas e organização do trabalho, esses elementos contribuem significativamente para a redução de riscos e para a melhoria das condições laborais no meio rural.

Além disso, a incorporação de tecnologias emergentes tem ampliado as possibilidades de prevenção. Sensores baseados em Internet das Coisas (IoT), sistemas inteligentes de monitoramento e o uso de drones permitem identificar falhas mecânicas, mapear riscos no ambiente de trabalho e antecipar situações de perigo com maior precisão. Contudo, a efetividade dessas ferramentas

depende de sua integração com o conhecimento prático dos trabalhadores e com os métodos tradicionais já consolidados no campo, evidenciando a necessidade de uma transição tecnológica gradual e inclusiva.

Do ponto de vista normativo, observam-se avanços importantes, como a atualização das diretrizes da Norma Regulamentadora nº 31 (NR-31), que passou a incorporar, de forma mais abrangente, aspectos relacionados à saúde mental e ao bem-estar dos trabalhadores rurais. Ainda assim, persistem desafios na aplicação dessas normas, especialmente no que se refere à atualização de laudos ergonômicos, à fiscalização e à adaptação das exigências legais à realidade das pequenas propriedades.

Outro aspecto crítico refere-se à capacitação da mão de obra. A introdução de tecnologias digitais, como IoT e inteligência artificial, embora contribua para a redução de acidentes e para o aumento da eficiência produtiva, exige trabalhadores qualificados e abertos à inovação. Nesse contexto, a resistência à digitalização, particularmente entre trabalhadores mais experientes, e a limitação no acesso à formação continuada constituem barreiras que precisam ser superadas por meio de políticas públicas, assistência técnica e programas de educação no campo.

Adicionalmente, é importante considerar riscos muitas vezes negligenciados, como aqueles relacionados a animais peçonhentos, condições climáticas extremas, sobrecarga física e aspectos psicossociais do trabalho rural. A adoção de estratégias integradas de prevenção, que contemplem desde o uso de EPIs até o acesso a serviços de saúde e atendimento emergencial, até o acesso a serviços de saúde, atendimento emergencial e programas permanentes de capacitação, é fundamental para uma abordagem mais abrangente da segurança no trabalho.

Nesse cenário, a agroecologia emerge como uma abordagem estratégica não apenas para a sustentabilidade ambiental, mas também para a promoção da saúde e da segurança no trabalho. Ao reduzir o uso de agrotóxicos, estimular a diversificação produtiva e favorecer a adoção de sistemas agroflorestais, a cafeicultura agroecológica contribui para a diminuição da exposição a agentes químicos, para a regulação do microclima e para a melhoria das condições laborais. Além disso, práticas como o manejo orgânico do solo, a cobertura

vegetal e o fortalecimento da biodiversidade promovem ambientes produtivos mais resilientes, reduzindo riscos ocupacionais e ampliando o bem-estar dos trabalhadores rurais.

A agroecologia também fortalece a dimensão social da segurança ao estimular a organização coletiva, a troca de saberes e a valorização do conhecimento local. Esses elementos favorecem a construção de uma cultura preventiva mais participativa e consciente, na qual os trabalhadores assumem papel ativo na identificação e no gerenciamento dos riscos presentes no ambiente produtivo.

Dessa forma, o futuro da cafeicultura depende da capacidade de integrar inovação tecnológica, gestão eficiente, sustentabilidade ambiental e valorização do trabalho humano. Investir na proteção dos trabalhadores não deve ser compreendido apenas como uma exigência legal, mas como um componente essencial da qualidade da produção, da competitividade do setor e da sustentabilidade dos sistemas cafeeiros.

Nesse contexto, a convergência entre tecnologia, agroecologia e gestão preventiva configura-se como um dos caminhos mais promissores para a construção de sistemas cafeeiros capazes de conciliar produtividade, sustentabilidade ambiental, proteção à saúde dos trabalhadores e desenvolvimento rural de longo prazo, consolidando a segurança do trabalho como um dos pilares da sustentabilidade na cafeicultura contemporânea.

11. Referências

- ALTIERI, M. A. **Agroecologia**: bases científicas para uma agricultura sustentável. 3. ed. São Paulo: Expressão Popular; Rio de Janeiro: AS-PTA, 2012.
- ANTLE, J. M.; PINGALI, P. L. Pesticides, productivity, and farmer health: a Philippine case study. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 76, n. 3, p. 418-430, 1994. DOI: 10.2307/1243654.
- ASSUNÇÃO, A. A. Agrotóxicos e saúde do trabalhador rural no Brasil: uma análise crítica. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, São Paulo, v. 44, e22, 2019.
- BAESSO, M. M.; MODOLO, A. J.; BAESSO, R. C. E.; TROGELLO, E. Segurança no uso de máquinas agrícolas: avaliação de riscos de acidentes no trabalho rural. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, Tupã, v. 12, n. 1, p. 101-109,

2018. Disponível em:
<https://seer.tupa.unesp.br/index.php/BIOENG/article/view/622>.

BOHNER, T. O. L.; ARAÚJO, L. E. B.; NISHIJIMA, T. Agrotóxicos: características, mecanismos de ação e impactos ambientais. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 17, n. 17, p. 3294-3305, 2013.

BRAIBANTE, M. E. F.; ZAPPE, J. A. A química dos agrotóxicos. **Química Nova na Escola**, São Paulo, v. 34, n. 1, p. 10-15, 2012.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Registro de agrotóxicos no Brasil: dados atualizados 2019–2022**. Brasília: MAPA, 2023.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 31: segurança e saúde no trabalho na agricultura, pecuária, silvicultura, exploração florestal e aquicultura**. Brasília, DF: MTE, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/nr-31-atualizada-2024-2.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2026.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 31 (NR-31): Segurança e Saúde no Trabalho na Agricultura, Pecuária, Silvicultura, Exploração Florestal e Aquicultura**. Brasília, DF: MTE, 2024.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 12 (NR-12): Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos**. Brasília, DF: MTE, 2024.

BRASIL. **Portaria n.º 1.245, de 30 de março de 2024**. Dispõe sobre Programas de Resiliência Emocional. Diário Oficial da União, Brasília, 2024.

BURALLI, R. J.; RIBEIRO, H.; MAUAD, T.; AMATO-LOURENÇO, L. F.; SALGE, J. M.; DIAZ-QUIJANO, F. A.; LEÃO, R. S.; MARQUES, R. C.; SILVA, D. S.; GUIMARÃES, J. R. D. Occupational exposure to pesticides and health symptoms among family farmers in Brazil. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 12, p. 5783-5794, 2021.

CAPORAL, F. R.; COSTABEBER, J. A. **Agroecologia: alguns conceitos e princípios**. Brasília, DF: MDA/SAF, 2004.

CARNEIRO, F. F.; AUGUSTO, L. G. S.; RIGOTTO, R. M.; FRIEDRICH, K.; BÚRIGO, A. C. (org.). **Dossiê ABRASCO: um alerta sobre os impactos dos agrotóxicos na saúde**. Rio de Janeiro: EPSJV; São Paulo: Expressão Popular, 2015. 624 p

CARVALHO, F. P.; ALONZO, H. G. A. Uso de agrotóxicos na agricultura familiar brasileira: desafios e perspectivas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 60, n. 1, e234567, 2022.

CEREST. Centro de Referência em Saúde do Trabalhador. **Relatório Nacional de Acidentes em Unidades de Beneficiamento de Café**. Brasília: Ministério da Saúde, 2025.

DUTRA, R. M. S.; SOUZA, M. M. O uso de agrotóxicos no Brasil: uma análise histórica e crítica. **Revista de Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 2, p. 321-340, 2017.

ERGOCAFÉ/UFV. **Cargas ergonômicas na colheita manual: impactos biomecânicos**. Viçosa: UFV, 2025.

EVANGELISTA, A. de S. **Percepção de risco em operações com agrotóxicos na cafeicultura em uma comunidade do sul de Minas. 2023**.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **One health in coffee farming: case studies from Brazil**. Roma: FAO, 2025.

FUNASA. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de controle de animais peçonhentos**. Brasília: FUNASA, 2010.

FUNDACENTRO. Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho. **Manual de prevenção de acidentes no trabalho rural**. São Paulo: Fundacentro, 2021.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2015.

LEFF, E. Agroecologia e saber ambiental. **Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável**, Porto Alegre, v. 3, n. 1, p. 36-51, 2002.

LOBELL, D. B.; BURKE, M. Climate change and agriculture: impacts and adaptation. **Annual Review of Environment and Resources**, Palo Alto, v. 38, p. 283-307, 2013. DOI: 10.1146/annurev-environ-012012-053856. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012012-053856>

OIT. Organização Internacional do Trabalho. **Segurança e Saúde na Agricultura em Países Emergentes**. Genebra: OIT, 2025.

PERES, F.; MOREIRA, J. C. Saúde e ambiente em sua relação com o consumo de agrotóxicos em um polo agrícola do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 23, supl. 4, p. S612-S621, 2007.

SILVA, J. M. V. O.; SOUZA, M. N. **Produção de café orgânico: práticas agroecológicas conservacionistas e novas tecnologias disponíveis ao produtor rural**. 1. ed. Mauritius: Novas Edições Acadêmicas, 2021.

VILELA, R. A. G.; ALMEIDA, I. M.; MENDES, R. W. B. Acidentes de trabalho em máquinas agrícolas: análise de 1.319 casos. **Revista de Saúde Pública**, São Paulo, v. 37, n. 5, p. 635-642, 2003. DOI: 10.1590/S0034-89102003000500016.

WHO. World Health Organization. **Global Report on Pesticide Poisoning in Agriculture**. Genebra: WHO, 2025.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A cafeicultura contemporânea encontra-se diante de um dos períodos mais desafiadores de sua história. As mudanças climáticas, a crescente pressão sobre os recursos naturais, a volatilidade dos mercados agrícolas e as novas exigências relacionadas à rastreabilidade e à sustentabilidade impõem a necessidade de repensar modelos produtivos tradicionalmente baseados na simplificação dos agroecossistemas e na elevada dependência de insumos externos.

Nesse contexto, a agroecologia consolida-se não apenas como uma alternativa técnica, mas como uma abordagem capaz de integrar conhecimentos científicos, processos ecológicos e saberes construídos ao longo de gerações de agricultores. Sua aplicação à cafeicultura permite compreender a propriedade rural como um sistema vivo e dinâmico, no qual solo, água, biodiversidade, clima, trabalho humano e produção agrícola estabelecem relações de interdependência fundamentais para a sustentabilidade.

Ao longo desta obra, diferentes aspectos relacionados à construção de sistemas cafeeiros mais resilientes foram discutidos. Questões associadas à conservação dos recursos naturais, à adaptação aos eventos climáticos extremos, à melhoria da qualidade do solo, ao aproveitamento sustentável de resíduos, à valorização dos serviços ecossistêmicos e à promoção da saúde e da segurança dos trabalhadores rurais evidenciam que a sustentabilidade depende da integração entre múltiplos fatores ecológicos, econômicos e sociais.

Os avanços científicos recentes também demonstram que a qualidade e a produtividade dos cafezais não podem ser dissociadas da saúde dos agroecossistemas. Solos biologicamente ativos, maior diversidade funcional, ciclagem eficiente de nutrientes, conservação da água e manejo ecológico contribuem simultaneamente para o desempenho agrônomo das lavouras e para a redução de impactos ambientais. Da mesma forma, estratégias voltadas à economia circular, ao reaproveitamento de resíduos, à produção de bioinsumos e ao uso racional dos recursos fortalecem a autonomia produtiva e ampliam a eficiência dos sistemas agrícolas.

Outro aspecto relevante refere-se à crescente valorização de cafés produzidos sob princípios sustentáveis. Cada vez mais, consumidores, certificadoras e mercados reconhecem que a qualidade do café transcende

atributos físicos e sensoriais, incorporando elementos relacionados à origem, à responsabilidade socioambiental, à rastreabilidade e à identidade territorial. Essa tendência amplia oportunidades para produtores que adotam práticas compatíveis com os princípios da agroecologia e da agricultura regenerativa.

Entretanto, a construção de uma cafeicultura sustentável não depende apenas da adoção de técnicas específicas. Exige investimentos contínuos em pesquisa, extensão rural, capacitação de agricultores, inovação tecnológica e formulação de políticas públicas capazes de incentivar processos de transição agroecológica. Trata-se de um esforço coletivo que envolve produtores, pesquisadores, instituições de ensino, organizações da sociedade civil e consumidores.

Finalmente, pode-se concluir que o futuro da cafeicultura estará diretamente associado à capacidade de produzir em harmonia com os limites ecológicos dos territórios. Sistemas produtivos que conservam o solo, protegem a água, valorizam a biodiversidade, promovem a saúde e a segurança dos trabalhadores e utilizam os recursos de forma eficiente tendem a apresentar maior resiliência frente às incertezas climáticas e econômicas das próximas décadas.

A agroecologia, nesse cenário, não representa apenas uma proposta de manejo agrícola, mas uma estratégia de construção de futuro. Um futuro no qual a produção de café continue gerando renda, cultura, identidade e desenvolvimento, sem comprometer os recursos naturais que sustentam a vida e a própria continuidade da atividade cafeeira. Assim, a construção de uma cafeicultura mais resiliente, regenerativa e sustentável deixa de ser uma possibilidade desejável para tornar-se uma necessidade estratégica para as atuais e futuras gerações.

Professor Maurício Novaes

Guarapari, junho de 2025.



MÉRIDA
PUBLISHERS

www.meridapublishers.com