

ORGANIZADOR:
Maurício Novaes Souza

Tópicos em cafeicultura

Cafeicultura agroflorestal e sustentabilidade:
serviços ecossistêmicos, valorização territorial
e estudo de caso do Sítio Relíquia do Caparaó

Volume VII



M
MÉRIDA
PUBLISHERS

ORGANIZADOR:
Maurício Novaes Souza

Tópicos em cafeicultura

**Cafeicultura agroflorestal e sustentabilidade:
serviços ecossistêmicos, valorização territorial
e estudo de caso do Sítio Relíquia do Caparaó**

Volume VII

Canoas
2026



Organizador

Maurício Novaes Souza

Autores

Maurício Novaes Souza

José Elias Alves Adão

Filipe Teixeira Pinheiro de Souza

Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira

Atanásio Alves do Amaral

Willian Moreira da Costa



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 Michelon 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.

Tópicos em Cafeicultura Volume VII

© 2026 Mérida Publishers

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-47-3>

Organizador

Maurício Novaes Souza

Revisão ortográfica

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 e contracapa

Maurício Novaes 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. VII [livro eletrônico] : cafeicultura agroflorestal e sustentabilidade : serviços ecossistêmicos, valorização territorial e estudo de caso do Sítio Relíquia do Caparaó / Maurício Novaes Souza ... [et al.]. – 1. ed. – Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026. – (Tópicos em Cafeicultura ; v. 7)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia.

ISBN 978-65-84548-47-3

1. Cafeicultura. 2. Agricultura. I. Souza, Maurício Novaes. II. Adão, José Elias Alves. III. Souza, Filipe Teixeira Pinheiro de. IV. Oliveira, Carlos Henrique Rodrigues de. V. Amaral, Atanásio Alves do. VI. Costa, Willian Moreira da. VII. Série.

CDD 630

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

ORGANIZADOR E AUTORES

Maurício Novaes Souza



Maurício Novaes Souza é Engenheiro Agrônomo pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), onde também concluiu o Mestrado e o Doutorado. Iniciou sua carreira docente no então Centro Federal de Educação Tecnológica de Rio Pomba (CEFET-RP), em Minas Gerais, instituição na qual exerceu diversas funções acadêmicas e administrativas. Foi coordenador dos cursos Técnico em Meio Ambiente, nas modalidades presencial e a distância, e da Pós-Graduação *lato sensu* em Agroecologia durante nove anos. Também atuou como Diretor-Geral dos campi Araçuaí e São João del-Rei do Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais, além de participar de importantes instâncias de gestão e assessoramento, como o Conselho Estadual de Política Ambiental de Minas Gerais (COPAM), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), conselhos municipais de meio ambiente, comitês de saneamento básico e órgãos de apoio técnico ao Ministério Público. Atualmente é Professor Titular do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), Campus de Alegre, onde atua nos cursos de Agronomia e Tecnologia em Cafeicultura e como docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Agroecologia (PPGA). Desenvolve atividades de ensino, pesquisa e extensão voltadas ao desenvolvimento sustentável, com ênfase em agroecologia, cafeicultura sustentável, sistemas agroflorestais, recuperação de áreas degradadas, conservação do solo e da água, gestão de recursos hídricos, agricultura regenerativa e sustentabilidade. Paralelamente, coordena projetos de extensão voltados ao fortalecimento da agricultura familiar, promovendo a integração entre conhecimento científico, inovação e saberes tradicionais. Como pesquisador e orientador, já contribuiu para a formação de mais de quinhentos estudantes dos níveis técnico, graduação, iniciação científica, especialização, mestrado e doutorado. Como escritor, é autor e coautor de mais de quatrocentas publicações entre livros, capítulos, artigos científicos e boletins técnicos. Coordena as séries editoriais *Tópicos em Recuperação de Áreas Degradadas*, *Tópicos em Gestão Ambiental* e *Tópicos em Cafeicultura*, além de integrar a equipe organizadora da série *Tópicos em Agroecologia*. Sua trajetória profissional é marcada pelo compromisso com a produção e a difusão do conhecimento científico, buscando integrar ensino, pesquisa, inovação, conservação ambiental.

Contato: Professor do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), Campus de Alegre, nos cursos de Agronomia, Tecnologia em Cafeicultura e no Programa de Pós-Graduação em Agroecologia. Caixa Postal 47, CEP 29500-000, Alegre, ES. E-mail: mauricios.novaes@ifes.edu.br.

Autores

José Elias Alves Adão



José Elias Alves Adão é mestrando em Agroecologia pelo Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), Campus de Alegre. É graduado em Tecnologia em Cafeicultura e técnico em Agropecuária pelo Ifes, Campus de Alegre, e graduando em Engenharia Agrônômica pela Universidade de Caratinga (UNEC). Desenvolve atividades de ensino, pesquisa e extensão voltadas à cafeicultura, com ênfase na qualidade do café e na produção sustentável. Suas áreas de atuação concentram-se na cafeicultura, análise sensorial, cafés especiais, assistência técnica e manejo sustentável dos sistemas de produção. Possui certificação internacional em análise sensorial de cafés (Q-Grader/Q-Evolved), concedida pela Coffee Quality Institute (CQI) e pela Specialty Coffee Association (SCA), atuando na avaliação da qualidade física e sensorial de cafés especiais. É sócio do Sítio Relíquia do Caparaó, onde desempenha a função de analista de qualidade dos cafés produzidos na propriedade, contribuindo para o aprimoramento dos processos de produção e pós-colheita. Paralelamente, participa de projetos de pesquisa e extensão relacionados à qualidade do café, inovação tecnológica e assistência técnica aos produtores. Sua atuação é pautada pelo compromisso com a difusão do conhecimento e com o fortalecimento da cafeicultura brasileira, buscando integrar ciência, inovação, sustentabilidade e valorização dos cafés especiais como instrumentos de desenvolvimento regional.

Contato: Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), Campus de Alegre. Rodovia Cachoeiro de Itapemirim–Alegre, km 46, Distrito de Rive, Fazenda Caixa D'Água, CEP 29520-000, Alegre, ES. E-mail: j.elias.adao@gmail.com.

Filipe Teixeira Pinheiro de Souza



Filipe Teixeira é mestrando em Agroecologia pelo Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), Campus de Alegre. É licenciado em Ciências Biológicas pelo Ifes, Campus de Alegre, e técnico em Meio Ambiente pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial (Senac). Atua em atividades de pesquisa, inovação e extensão voltadas ao desenvolvimento de tecnologias sustentáveis aplicadas à agroecologia e ao aproveitamento de resíduos agroindustriais. Suas pesquisas concentram-se nas áreas de microbiologia do solo, bioinsumos, manejo sustentável do solo, produção e caracterização de biocarvões, aproveitamento de resíduos da bananicultura, inovação tecnológica e educação ambiental. Paralelamente, desenvolve projetos voltados à economia circular e à valorização de subprodutos agrícolas, buscando integrar conhecimento científico, sustentabilidade e inovação. É sócio fundador e diretor executivo do Núcleo de Inovação em Resíduos do Caparaó (NIRC), onde coordena projetos de pesquisa, desenvolvimento tecnológico e reaproveitamento integral de resíduos agrícolas, com destaque para a iniciativa InovaCitrus. Participa de projetos de pesquisa e extensão, integra comissões científicas e atua como avaliador de trabalhos em eventos acadêmicos, contribuindo para a difusão do conhecimento nas áreas das Ciências Agrárias e Ciências Biológicas. Sua atuação é pautada pelo compromisso com a produção e a aplicação do conhecimento científico, buscando desenvolver soluções inovadoras para o manejo sustentável dos recursos naturais, a valorização dos resíduos agroindustriais e o fortalecimento da agroecologia como estratégia para uma agricultura mais sustentável e resiliente.

Contato: Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), Campus de Alegre. Rodovia Cachoeiro de Itapemirim–Alegre, km 46, Distrito de Rive, Fazenda Caixa D'Água, CEP 29520-000, Alegre, ES. E-mail: filipeteixeira156@gmail.com.

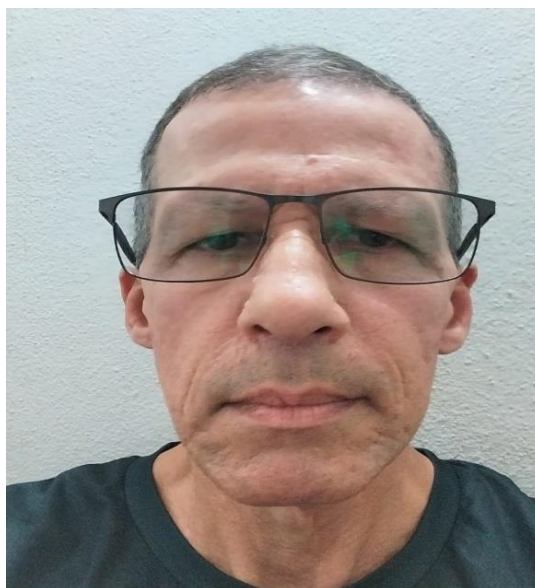
Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira



Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira é Engenheiro Florestal pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), onde também concluiu o Mestrado e o Doutorado em Ciência Florestal, além de ser licenciado em Ciências Biológicas. Iniciou sua trajetória profissional desenvolvendo pesquisas na área florestal, atuando posteriormente como Engenheiro Florestal e Supervisor do Programa de Fomento Florestal da ASIFLOR, em convênio com o Instituto Estadual de Florestas de Minas Gerais. Atualmente é Professor Titular do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), Campus de Alegre, coordenador do curso de Licenciatura em Ciências Biológicas e docente permanente dos Programas de Pós-Graduação em Agroecologia (Ifes) e Agroquímica (Ufes), desenvolvendo atividades de ensino, pesquisa e extensão voltadas ao desenvolvimento sustentável. Suas pesquisas concentram-se nas áreas de sistemas agroflorestais, silvicultura, produção de mudas, recuperação de áreas degradadas, conservação dos recursos hídricos, restauração florestal e agroecologia. Paralelamente, coordena projetos de pesquisa e extensão voltados à sustentabilidade ambiental, promovendo a integração entre conhecimento científico, inovação tecnológica e desenvolvimento rural. Como pesquisador e escritor, é autor e coautor de mais de duzentas publicações científicas entre livros, capítulos, artigos e boletins técnicos. É líder do Grupo de Pesquisa Meio Ambiente e Silvicultura (SIEMA/CNPq), orientou mais de uma centena de estudantes de iniciação científica, mestrado e doutorado e coordena projetos voltados à produção florestal sustentável e à recuperação ambiental. Exerceu a função de Diretor de Pesquisa, Pós-Graduação e Extensão do Ifes – Campus Ibatiba (2017–2019), coordenou o curso de Pós-Graduação em Agroecologia e Sustentabilidade (2022–2025) e foi membro da Câmara de Assessoramento da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) na área de Ciências Florestais. Desde 2022, é bolsista Pesquisador Capixaba da FAPES. Em reconhecimento às ações de extensão desenvolvidas junto à sociedade, coordena projeto contemplado com o Prêmio Biguá de Sustentabilidade, em 2024.

Contato: Professor do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), Campus de Alegre, coordenador do curso de Licenciatura em Ciências Biológicas e docente dos Programas de Pós-Graduação em Agroecologia (Ifes) e Agroquímica (Ufes). Caixa Postal 47, CEP 29500-000, Alegre, ES. E-mail: carlos.oliveira@ifes.edu.br.

Atanásio Alves do Amaral



Atanásio Alves do Amaral possui graduação (Bacharelado e Licenciatura) em Ciências Biológicas pela Universidade Federal de Viçosa (1986), especialização em Zoologia pela Fundação Educacional Severino Sombra (1991), aperfeiçoamento em Ensino de Química pela Universidade Estadual do Centro-Oeste (1994), mestrado em Aquicultura (Biologia de Organismos Aquáticos) pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (1999), doutorado em Aquicultura (Aquicultura de Águas Continentais) pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (2003) e pós-doutorado em Aquicultura (Limnologia de Viveiros) pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (2008). Atualmente é Professor Titular do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (Ifes), Campus de Alegre, onde atua como coordenador do curso de Engenharia de Aquicultura. Desenvolve atividades de ensino, pesquisa e extensão nas áreas de anatomia e histologia de peixes, curadoria de coleções zoológicas, ecologia de ambientes aquáticos continentais, ecologia e sistemática de organismos aquáticos, ecologia e sistemática de meso e macroinvertebrados terrestres, ecologia de agroecossistemas, patologia de animais aquáticos e ensino de Biologia. Também ministrou a disciplina Ecologia de Agroecossistemas no curso de pós-graduação *lato sensu* em Agroecologia. É autor do livro *Fundamentos de Agroecologia*, publicado pela Editora do Livro Técnico, além de dezenas de artigos científicos e capítulos de livros.

Contato: Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (Ifes), Campus de Alegre. Caixa Postal 47, CEP: 29.500-000, Alegre, ES. E-mail: atanasio.amaral@ifes.edu.br.

Willian Moreira da Costa



Willian Moreira da Costa é doutorando em Agroecologia pelo Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), Campus de Alegre. É mestre em Agroecologia, especialista em Agroecologia e Sustentabilidade e graduado em Licenciatura e Bacharelado em Ciências Biológicas pela mesma instituição. Desenvolve atividades de ensino, pesquisa e extensão voltadas à conservação da biodiversidade, à agroecologia e à sustentabilidade. Suas pesquisas concentram-se nas áreas de ecologia e comportamento de abelhas nativas, polinizadores agrícolas, plantas melitófilas, entomologia, comportamento animal, conservação da biodiversidade e educação ambiental. Atua principalmente em estudos relacionados aos serviços ecossistêmicos da polinização e à conservação de insetos polinizadores em agroecossistemas. É Professor Regente de Biologia e Coordenador da Área de Ciências da Natureza e Matemática da Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio Wilson Resende. Também atua como Agente Ambiental na Floresta Nacional de Pacotuba (ICMBio), desenvolvendo atividades de educação ambiental, apoio à pesquisa científica e ações voltadas à conservação dos recursos naturais. Sua atuação é pautada pelo compromisso com a produção e a difusão do conhecimento científico, buscando integrar ensino, pesquisa, conservação da biodiversidade e educação ambiental para fortalecer práticas sustentáveis e contribuir para a conservação dos polinizadores e dos ecossistemas.

Contato: Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), Campus de Alegre. Caixa Postal 47, CEP 29500-000, Alegre, ES, Brasil. E-mail:

willianbiologo@hotmail.com.

Síntese da obra

O livro *Cafeicultura agroflorestal e sustentabilidade: serviços ecossistêmicos, valorização territorial e estudo de caso do Sítio Relíquia do Caparaó* reúne fundamentos científicos e aplicações práticas dos Sistemas Agroflorestais (SAFs) aplicados à cafeicultura, integrando conhecimentos de agroecologia, ecologia, sucessão ecológica, agricultura sintrópica e agricultura regenerativa. Ao longo da obra são discutidos os processos ecológicos que sustentam os agroecossistemas cafeeiros, destacando o papel da biodiversidade, dos serviços ecossistêmicos, da conservação do solo e da água, da ciclagem de nutrientes, da polinização, do controle biológico e da mitigação dos impactos das mudanças climáticas na construção de sistemas produtivos mais resilientes e sustentáveis.

A obra apresenta os princípios de planejamento, implantação, manejo e avaliação de Sistemas Agroflorestais, abordando seus benefícios ambientais, sociais e econômicos, bem como os desafios técnicos, culturais, institucionais e financeiros que ainda limitam sua expansão. Também discute estratégias de valorização da produção agroflorestal por meio de certificações, políticas públicas, pagamento por serviços ambientais, agregação de valor e fortalecimento da agricultura familiar, evidenciando o potencial dos SAFs como instrumento de desenvolvimento territorial sustentável.

Como aplicação prática, o livro apresenta um estudo de caso desenvolvido no Sítio Relíquia do Caparaó, demonstrando como a integração entre pesquisa científica, assistência técnica e gestão da propriedade pode promover ganhos em qualidade ambiental, produtividade, diversificação da produção, conservação da biodiversidade e viabilidade econômica. Ao reunir bases conceituais, evidências científicas e experiências de campo, esta obra constitui uma referência para estudantes, pesquisadores, extensionistas, técnicos e produtores interessados na construção de uma cafeicultura mais sustentável, resiliente e alinhada aos princípios da Agroecologia.

Professor Maurício Novaes.

Guarapari, julho de 2026.

Dedicatória

Dedico esta obra aos agricultores familiares que, todos os dias, transformam trabalho, conhecimento e esperança em alimento, preservando a terra e construindo um futuro mais sustentável para as próximas gerações.

De maneira muito especial, dedico este livro à família proprietária do Sítio Relíquia do Caparaó, JOSÉ ISIDORO ADÃO E MARIA DA GLÓRIA ALVES ADÃO, cuja dedicação à cafeicultura, respeito à natureza e generosidade em compartilhar sua experiência tornaram possível a realização deste estudo. Sua trajetória demonstra que produzir cafés de excelência, conservar os recursos naturais e valorizar o território são objetivos plenamente compatíveis quando a atividade agrícola é conduzida com base nos princípios da agroecologia.

Esta homenagem torna-se ainda mais significativa pelo fato de seus dois filhos (José Elias e Lucas) terem sido meus alunos no Ifes Campus de Alegre. Ao longo dessa convivência, tive o privilégio de acompanhar não apenas sua formação acadêmica, mas também o compromisso da família com a produção sustentável e a busca permanente pelo conhecimento. Em especial, José Elias, mestrando em Agroecologia do PPGA e coautor desta obra, representa a continuidade desse processo, integrando a experiência construída no campo ao conhecimento científico desenvolvido na instituição.

Que esta dedicatória represente também o reconhecimento a milhares de produtores rurais que, muitas vezes de forma silenciosa, enfrentam diariamente os desafios impostos pelo clima, pelas oscilações dos mercados, pelos elevados custos de produção e pelas inúmeras dificuldades da atividade agrícola, sem perder a esperança nem o compromisso com a terra.

Cada lavoura cultivada, cada nascente protegida, cada árvore preservada e cada grão de café produzido com responsabilidade carregam uma história de trabalho, perseverança e amor pelo campo.

A todos aqueles que fazem da agricultura não apenas uma profissão, mas um modo de cuidar da vida, minha profunda gratidão.

Professor Maurício Novaes

Guarapari, julho de 2026.

Prefácio

Nas últimas décadas, a agricultura tem sido chamada a responder a um dos maiores desafios de sua história: produzir alimentos em quantidade e qualidade suficientes para atender a uma população crescente, preservando simultaneamente os recursos naturais que sustentam a própria produção. Na cafeicultura, esse desafio assume contornos ainda mais complexos diante das mudanças climáticas, da crescente pressão sobre a biodiversidade, da degradação dos solos e das novas exigências relacionadas à sustentabilidade, à rastreabilidade e à valorização da origem dos produtos.

Durante muito tempo, a busca por maiores produtividades esteve associada à simplificação dos sistemas agrícolas. A redução da diversidade biológica, a especialização das lavouras e a elevada dependência de insumos externos tornaram-se características predominantes de grande parte da agricultura moderna. Embora esse modelo tenha proporcionado importantes avanços produtivos, também revelou limitações relacionadas à degradação ambiental, à instabilidade ecológica e à crescente vulnerabilidade frente às oscilações climáticas e econômicas.

Nesse contexto, os Sistemas Agroflorestais representam muito mais do que uma alternativa de manejo. Constituem uma nova forma de compreender a relação entre agricultura e natureza. Em vez de substituir os processos ecológicos, procuram restabelecê-los. Em vez de simplificar os agroecossistemas, valorizam sua complexidade. Em vez de combater a biodiversidade, reconhecem nela um dos principais fatores responsáveis pela estabilidade, pela produtividade e pela resiliência dos sistemas agrícolas.

Ao longo desta obra, a cafeicultura agroflorestal é apresentada sob uma perspectiva integradora, na qual conceitos tradicionalmente tratados de forma isolada passam a dialogar entre si. Ecologia, agroecologia, sucessão ecológica, agricultura sintrópica, termodinâmica, nichos ecológicos, serviços ecossistêmicos, economia rural e desenvolvimento territorial deixam de representar campos independentes do conhecimento para compor uma interpretação sistêmica do funcionamento dos agroecossistemas cafeeiros.

Essa abordagem permite compreender que a produtividade de uma lavoura não depende exclusivamente da genética das cultivares ou do emprego de tecnologias de alto custo. Ela resulta da interação contínua entre solo, água, clima, biodiversidade, paisagem e manejo. Cada árvore incorporada ao sistema, cada organismo presente no solo, cada polinizador, cada inimigo natural e cada processo ecológico estabelecido contribuem, de maneira direta ou indireta, para a construção de um ambiente produtivo mais equilibrado e resiliente.

Essa visão amplia o próprio conceito de sustentabilidade. Produzir café de forma sustentável significa conservar o solo, proteger os recursos hídricos, favorecer a biodiversidade, reduzir a dependência de insumos externos, mitigar as emissões de gases de efeito estufa, fortalecer a agricultura familiar, diversificar as fontes de renda e valorizar os territórios onde o café é cultivado. A sustentabilidade deixa, assim, de representar apenas um atributo ambiental para assumir uma dimensão integrada, envolvendo aspectos ecológicos, econômicos, sociais e culturais.

É justamente nessa integração que reside uma das maiores contribuições desta obra. Além de discutir os fundamentos científicos dos Sistemas Agroflorestais, o livro aproxima teoria e prática por meio do estudo de caso do Sítio Relíquia do Caparaó. A experiência demonstra que os princípios agroecológicos podem ser efetivamente incorporados à realidade produtiva, gerando benefícios ambientais, fortalecimento econômico da propriedade e valorização do território. O caso evidencia que a recuperação ambiental e a produção agrícola não são objetivos conflitantes, mas componentes complementares de um mesmo processo de desenvolvimento rural sustentável.

Outro aspecto que permeia este livro é o reconhecimento de que as paisagens agrícolas produzem muito mais do que alimentos. Elas regulam o ciclo da água, armazenam carbono, conservam a biodiversidade, protegem os solos, favorecem a polinização, mantêm processos ecológicos essenciais e preservam conhecimentos construídos por sucessivas gerações de agricultores. Esses benefícios, conhecidos como serviços ecossistêmicos, constituem um patrimônio coletivo cuja importância extrapola os limites das propriedades rurais e alcança toda a sociedade.

Ao reconhecer essa multifuncionalidade, a cafeicultura passa a ocupar um papel estratégico no desenvolvimento territorial. Programas de Pagamento por Serviços Ambientais, iniciativas de restauração florestal, certificações socioambientais, indicações geográficas e Denominações de Origem demonstram que conservar a natureza também significa agregar valor à produção, fortalecer identidades regionais e criar novas oportunidades para os agricultores.

Mais do que apresentar conceitos técnicos, esta obra convida o leitor a refletir sobre uma mudança de paradigma. A natureza deixa de ser percebida apenas como fornecedora de recursos e passa a ser reconhecida como parceira indispensável da produção agrícola. A biodiversidade deixa de representar um elemento acessório para assumir papel central na estabilidade dos agroecossistemas. O agricultor deixa de atuar apenas como produtor de alimentos para tornar-se também gestor da paisagem, promotor da conservação ambiental e protagonista do desenvolvimento sustentável.

Na epígrafe desta obra compartilho uma reflexão que sintetiza o espírito deste livro:

"A floresta não compete com o café; ela ensina o café a permanecer. Quanto maior a diversidade da vida, maior a capacidade da paisagem de produzir, conservar e renovar o futuro."

Essa reflexão traduz a principal mensagem desta obra: a sustentabilidade não nasce da simplificação dos sistemas produtivos, mas da capacidade de compreender, respeitar e fortalecer os processos ecológicos que sustentam a vida. É nessa integração entre ciência, natureza e experiência dos agricultores que reside o caminho para uma cafeicultura mais resiliente, produtiva e comprometida com as futuras gerações.

Que as páginas que seguem possam estimular novas pesquisas, inspirar políticas públicas, fortalecer a extensão rural e, sobretudo, contribuir para que produtores, estudantes, pesquisadores e profissionais encontrem nos Sistemas Agroflorestais não apenas uma técnica de cultivo, mas uma nova forma de pensar o desenvolvimento da cafeicultura brasileira.

Professor Maurício Novaes

Guarapari, junho de 2026.

EPÍGRAFE

A floresta não compete com o café: ela ensina o café a permanecer. Quanto maior a diversidade da vida, maior a capacidade da paisagem de produzir, conservar e renovar o futuro.

Maurício Novaes

Guarapari, julho de 2026.

Apresentação

A cafeicultura brasileira atravessa um período de profundas transformações. As mudanças climáticas, a crescente variabilidade das precipitações, a degradação dos recursos naturais, a redução da biodiversidade e as novas exigências dos mercados consumidores impõem desafios que ultrapassam os limites da produtividade agrícola. Produzir café de forma competitiva, ambientalmente responsável e socialmente justa tornou-se uma necessidade estratégica para a permanência da atividade e para a sustentabilidade dos territórios rurais.

Nesse contexto, os Sistemas Agroflorestais (SAFs) vêm se consolidando como uma das mais promissoras alternativas para a construção de modelos produtivos capazes de integrar conservação ambiental, diversificação econômica e fortalecimento da agricultura familiar. Ao incorporar árvores, culturas agrícolas e processos ecológicos em um mesmo sistema produtivo, os SAFs favorecem a ciclagem de nutrientes, a conservação do solo e da água, o aumento da biodiversidade funcional, o sequestro de carbono e a oferta de diversos serviços ecossistêmicos essenciais à produção agrícola. Mais do que uma técnica de cultivo, representam uma nova forma de compreender a propriedade rural como um ecossistema vivo, dinâmico e resiliente.

A agroecologia constitui o alicerce conceitual dessa abordagem. Seus princípios permitem compreender que a sustentabilidade dos agroecossistemas não depende exclusivamente da substituição de insumos ou da adoção isolada de tecnologias conservacionistas, mas da reorganização das relações ecológicas que sustentam a produção agrícola. Diversidade biológica, complementariedade funcional, sucessão ecológica, ciclagem de energia e nutrientes, cooperação entre espécies e valorização dos conhecimentos locais passam a desempenhar papel central na construção de sistemas produtivos mais estáveis e menos dependentes de insumos externos.

Ao longo desta obra, buscou-se integrar diferentes dimensões da sustentabilidade aplicadas à cafeicultura agroflorestal. Inicialmente, são apresentados os fundamentos ecológicos que sustentam os Sistemas Agroflorestais, discutindo princípios da agroecologia, ecologia de comunidades,

sucessão ecológica e agricultura sintrópica. Em seguida, são analisados os principais benefícios proporcionados pelos SAFs, incluindo a melhoria do microclima, a fertilidade do solo, a conservação da água, a biodiversidade funcional, o controle biológico de pragas, a segurança alimentar, a conectividade da paisagem e a oferta de serviços ecossistêmicos.

A obra também aborda aspectos técnicos relacionados à seleção de espécies, ao planejamento e manejo dos Sistemas Agroflorestais, bem como aos desafios técnicos, econômicos e institucionais para sua implantação, incluindo assistência técnica, certificações, agregação de valor, comercialização e políticas públicas de incentivo. Em uma perspectiva mais ampla, incorpora conceitos da Ecologia, da Agroecologia e da Termodinâmica aplicados aos agroecossistemas, explorando os fluxos de energia, a sucessão ecológica, a ocupação de nichos ecológicos e a biodiversidade funcional como fundamentos para compreender a elevada eficiência ecológica, a resiliência e a sustentabilidade dos sistemas agroflorestais em comparação aos modelos agrícolas simplificados.

Reconhecendo que a sustentabilidade envolve dimensões interdependentes, o livro dedica capítulos específicos à avaliação da viabilidade econômica dos Sistemas Agroflorestais e à dimensão social do desenvolvimento sustentável, discutindo aspectos relacionados à diversificação da produção, redução de riscos, geração de renda, fortalecimento da agricultura familiar, desenvolvimento territorial e melhoria da qualidade de vida das comunidades rurais. Dessa forma, procura-se evidenciar que a sustentabilidade somente se concretiza quando os componentes ambientais, econômicos e sociais são analisados de maneira integrada.

Como aplicação prática dos conceitos discutidos, apresenta-se o estudo de caso do Sítio Relíquia do Caparaó, localizado no município de Divino de São Lourenço, Espírito Santo. A experiência demonstra como a implantação de um Sistema Agroflorestal, associada ao Programa Reflorestar, pode promover simultaneamente recuperação ambiental, incremento da biodiversidade, melhoria das condições produtivas, conservação dos recursos hídricos, fortalecimento da agricultura familiar e valorização territorial. Mais do que relatar uma experiência bem-sucedida, o estudo de caso evidencia que a adoção dos

princípios agroecológicos pode ser tecnicamente viável, economicamente consistente e ambientalmente estratégica para diferentes realidades da cafeicultura brasileira.

Ao abordar temas como Pagamento por Serviços Ambientais, Denominação de Origem, conectividade da paisagem, conservação da biodiversidade e valorização dos territórios rurais, esta obra amplia a discussão sobre a função contemporânea da cafeicultura. O café deixa de ser compreendido apenas como uma commodity agrícola e passa a ser reconhecido como elemento estruturante de paisagens multifuncionais, capazes de produzir alimentos, conservar recursos naturais, gerar renda, fortalecer identidades territoriais e contribuir para o enfrentamento das mudanças climáticas.

Este livro foi concebido para estudantes, pesquisadores, extensionistas, profissionais das ciências agrárias, gestores públicos, produtores rurais e todos aqueles interessados na construção de sistemas agrícolas mais sustentáveis. Espera-se que os conhecimentos aqui apresentados contribuam para ampliar o diálogo entre ciência, extensão rural e saberes dos agricultores, fortalecendo iniciativas capazes de conciliar produção agrícola, conservação ambiental e desenvolvimento territorial.

Mais do que apresentar técnicas de manejo, esta obra propõe uma reflexão sobre o futuro da cafeicultura. Em um cenário de crescentes desafios ambientais, sociais e econômicos, acredita-se que os Sistemas Agroflorestais representam uma das estratégias mais promissoras para construir agroecossistemas resilientes, produtivos e capazes de harmonizar a geração de riqueza com a conservação da natureza. Se este livro contribuir para inspirar novas pesquisas, orientar políticas públicas e incentivar agricultores na adoção de práticas agroecológicas, seu propósito terá sido plenamente alcançado.

A elaboração desta obra também reflete um processo contínuo de construção coletiva do conhecimento, desenvolvido no âmbito do ensino, da pesquisa e da extensão. Ao longo dos últimos anos, a integração entre as atividades acadêmicas e a realidade da cafeicultura brasileira tem possibilitado transformar projetos de pesquisa, trabalhos de conclusão de curso, dissertações e experiências de campo em publicações técnico-científicas voltadas à difusão do conhecimento. Assim, este livro não representa um esforço isolado, mas

integra uma trajetória institucional comprometida com a formação de profissionais, a produção científica e a promoção de uma cafeicultura cada vez mais sustentável.

Nesse contexto, esta publicação dá continuidade às iniciativas desenvolvidas no Curso Superior de Tecnologia em Cafeicultura, atualmente ampliadas e aprofundadas por discentes e orientados do Programa de Pós-Graduação em Agroecologia, nos níveis *Lato Sensu* e *Stricto Sensu*, do Ifes – Campus de Alegre. Os capítulos aqui reunidos refletem a diversidade de pesquisas, experiências e reflexões construídas ao longo dos últimos anos, evidenciando a integração entre ensino, pesquisa e extensão como instrumento de geração e difusão do conhecimento.

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

A coleção **Tópicos em Cafeicultura** teve início com a publicação do **Volume I, Produção de Café Orgânico: práticas agroecológicas conservacionistas e novas tecnologias disponíveis ao produtor rural**, elaborado a partir do Trabalho de Conclusão de Curso de João Marcos Verly Oliveira da Silva, desenvolvido no Curso Superior de Tecnologia em Cafeicultura do Ifes Campus de Alegre. A excelente receptividade da obra, posteriormente traduzida para onze idiomas e disponibilizada internacionalmente pela *Amazon*, evidenciou o potencial da produção científica desenvolvida na instituição. Desde então, trabalhos de conclusão de curso, dissertações e projetos de pesquisa passaram a integrar essa iniciativa editorial, ampliando a difusão do conhecimento e consolidando a coleção como um espaço de divulgação da produção acadêmica voltada ao desenvolvimento sustentável da cafeicultura brasileira.

O primeiro volume (ISBN 978-620-2-80826-2), composto por cinco capítulos, foi publicado em 2021 pela editora Novas Edições Acadêmicas (*Meidrum Street, Mauritius*), constituindo o marco inicial desta coleção, que desde então vem sendo ampliada por meio da incorporação de novos temas,

pesquisas e experiências voltadas à inovação e à sustentabilidade da cafeicultura.

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, intitulado “Cafés Especiais”**, mantém o mesmo objetivo dos volumes anteriores: reunir informações necessárias para o desenvolvimento de conceitos de planejamento voltados à condução efetiva das lavouras cafeeiras, com foco na produção de cafés especiais e na realização das atividades produtivas de forma sustentável. Isso inclui a utilização de práticas agroecológicas conservacionistas para garantir não apenas a qualidade do café, mas também a preservação/conservação ambiental e a sustentabilidade da produção.

O Volume IV é composto por oito (8) capítulos, abordando 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” para a 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 posição do fruto nas plantas sobre os aspectos granulométricos e sensoriais de café arábica

Capítulo VII. Análise física e sensorial do café

Capítulo VIII. Agroecologia e a produção de cafés especiais.

Disponível em:

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

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 em 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 propõe uma compreensão integrada da cafeicultura, reconhecendo-a como um agroecossistema complexo, no qual processos 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. Sob essa perspectiva, são discutidas estratégias fundamentadas nos princípios da agroecologia e da agricultura regenerativa, contemplando temas relacionados ao manejo do solo e da água, à biodiversidade funcional, à ecofisiologia do cafeeiro, à economia circular, à inovação tecnológica e à promoção da sustentabilidade em toda a cadeia produtiva.

Publicado pela Mérida Publishers, o Volume VI está organizado em cinco capítulos que abordam diferentes dimensões da cafeicultura agroecológica contemporânea:

Capítulo I. Agroecologia e agricultura orgânica: alicerces da cafeicultura sustentável.

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

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

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

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

Ao integrar conhecimentos relacionados à agroecologia, às mudanças climáticas, à qualidade do solo, ao aproveitamento sustentável de resíduos e à saúde dos trabalhadores, este volume reafirma o compromisso da coleção Tópicos em Cafeicultura com a produção e a difusão de conhecimentos científicos voltados ao fortalecimento de uma cafeicultura inovadora, resiliente e comprometida com os princípios da sustentabilidade.

A obra está disponível para consulta em:

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

O **Volume VII da coleção Tópicos em Cafeicultura**, intitulado **Cafeicultura Agroflorestal e Sustentabilidade: serviços ecossistêmicos, valorização territorial e estudo de caso do Sítio Relíquia do Caparaó**, representa um novo marco na coleção ao dedicar-se integralmente aos Sistemas Agroflorestais (SAFs) como estratégia para a construção de uma cafeicultura mais resiliente, biodiversa, regenerativa e sustentável. A obra reúne fundamentos científicos e experiências práticas que demonstram como a integração entre árvores, cafeeiros e demais componentes da paisagem pode promover benefícios ambientais, sociais e econômicos, fortalecendo a sustentabilidade da produção cafeeira.

Mais do que apresentar técnicas de implantação e manejo, este livro

oferece uma abordagem sistêmica da cafeicultura, fundamentada nos princípios da agroecologia, da ecologia de ecossistemas, da agricultura regenerativa e do desenvolvimento territorial sustentável. Ao longo de seus capítulos, são discutidos os processos ecológicos que estruturam os Sistemas Agroflorestais, evidenciando o papel da biodiversidade funcional, da sucessão ecológica, da complementaridade entre espécies, da ciclagem de nutrientes, da conservação do solo e da água, da polinização, do controle biológico e dos serviços ecossistêmicos na promoção da produtividade, da estabilidade e da resiliência dos agroecossistemas cafeeiros, especialmente frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

Publicado pela Mérida Publishers, este volume está organizado em oito (8) capítulos integrados que conduzem o leitor desde os fundamentos científicos dos Sistemas Agroflorestais até sua aplicação prática em uma propriedade rural participante do Programa Reflorestar. A obra contempla temas relacionados aos princípios agroecológicos, ao planejamento, implantação e manejo de SAFs, aos benefícios ambientais, econômicos e sociais desses sistemas, aos desafios para sua adoção, à agricultura regenerativa, à valorização territorial, às políticas públicas de incentivo, às certificações, à agregação de valor dos cafés produzidos em sistemas sustentáveis e às múltiplas dimensões da sustentabilidade. Como eixo integrador, apresenta o estudo de caso do Sítio Relíquia do Caparaó, evidenciando, por meio de indicadores ambientais, econômicos e sociais, o potencial dos Sistemas Agroflorestais para conciliar produção agrícola, conservação da biodiversidade, recuperação ambiental e desenvolvimento rural sustentável.

Diferentemente dos volumes anteriores, organizados em torno de temas específicos da cafeicultura, esta obra foi concebida como um trabalho integrado, no qual os diferentes capítulos se complementam para construir uma visão abrangente sobre os Sistemas Agroflorestais como modelo de produção para a cafeicultura do século XXI. Ao articular ciência, inovação, experiências de campo e políticas públicas, o livro evidencia que a sustentabilidade da cafeicultura depende da integração entre conservação ambiental, viabilidade econômica, fortalecimento da agricultura familiar e valorização dos territórios produtores, constituindo uma referência para estudantes, pesquisadores, extensionistas,

técnicos e produtores interessados na construção de agroecossistemas mais resilientes, produtivos e ambientalmente responsáveis.

A obra está disponível para consulta em:

<https://www.meridapublishers.com/tca7>

Ao final desta obra, evidencia-se que a cafeicultura do futuro dependerá, cada vez mais, da capacidade de integrar produtividade, conservação ambiental, viabilidade econômica e responsabilidade social em sistemas produtivos resilientes e sustentáveis. Diante das mudanças climáticas, da crescente demanda por alimentos produzidos de forma ambientalmente responsável e da necessidade de conservar os recursos naturais, os Sistemas Agroflorestais consolidam-se como uma das estratégias mais promissoras para promover uma agricultura capaz de conciliar produção, biodiversidade e desenvolvimento territorial.

Ao longo dos capítulos, demonstrou-se que a adoção dos Sistemas Agroflorestais vai muito além da introdução de espécies arbóreas na lavoura cafeeira. Trata-se da construção de agroecossistemas fundamentados nos princípios da Agroecologia, nos quais a biodiversidade funcional, a sucessão ecológica, a conservação do solo e da água, a ciclagem de nutrientes, a polinização, o controle biológico e os demais serviços ecossistêmicos atuam de forma integrada para aumentar a estabilidade, a produtividade e a capacidade adaptativa dos sistemas de produção.

A obra evidencia, ainda, que a sustentabilidade da cafeicultura depende da integração entre conhecimento científico, inovação tecnológica, planejamento, assistência técnica qualificada e participação ativa dos agricultores. Nesse contexto, políticas públicas, programas de incentivo, mecanismos de pagamento por serviços ambientais, certificações e estratégias de valorização territorial constituem instrumentos fundamentais para ampliar a adoção dos Sistemas Agroflorestais e fortalecer a agricultura familiar.

O estudo de caso desenvolvido no Sítio Relíquia do Caparaó demonstra, na prática, que a implantação de Sistemas Agroflorestais pode gerar benefícios ambientais, econômicos e sociais simultaneamente. A experiência evidencia que é possível produzir cafés de elevada qualidade ao mesmo tempo em que se promove a recuperação ambiental, a conservação da biodiversidade, a proteção dos recursos hídricos, a diversificação da produção e o fortalecimento da identidade territorial, tornando a propriedade mais resiliente às mudanças climáticas e às oscilações de mercado.

Mais do que reunir conhecimentos científicos, esta obra procura estimular uma nova forma de compreender a cafeicultura, baseada na integração entre produção agrícola, processos ecológicos e desenvolvimento sustentável. Os Sistemas Agroflorestais são apresentados não apenas como uma alternativa tecnológica, mas como uma estratégia capaz de transformar a relação entre agricultura e natureza, promovendo sistemas produtivos mais equilibrados, eficientes e resilientes.

Espera-se que os conhecimentos apresentados neste volume contribuam para fortalecer novas pesquisas, orientar políticas públicas, subsidiar ações de assistência técnica e extensão rural e inspirar produtores, estudantes e profissionais das Ciências Agrárias na construção de uma cafeicultura cada vez mais sustentável, regenerativa e comprometida com a conservação ambiental e o desenvolvimento das futuras gerações.

Professor Maurício Novaes

Guarapari, julho de 2026.

Autores

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.

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

Filipe Teixeira Pinheiro de Souza

Licenciado em Ciências Biológicas pelo Instituto Federal do Espírito Santo, Mestrando em Agroecologia pelo Programa de Pós-Graduação do Ifes Campus de Alegre, Caixa Postal 47, CEP: 29.500-000. Alegre, ES. E-mail: filipeteixeira156@gmail.com.

José Elias Alves Adão

Tecnólogo em Cafeicultura e Mestrando 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: j.elias.adao@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

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

Resumo	34
Introdução	35
 Seção 2.....	 45
Fundamentos agroecológicos do SAF com café	45
2.1 PRINCÍPIOS DA AGROECOLOGIA APLICADOS AOS SISTEMAS AGROFLORESTAIS	48
2.2. ECOLOGIA DOS SISTEMAS AGROFLORESTAIS.....	52
2.3. SUCESSÃO ECOLÓGICA E AGRICULTURA SINTRÓPICA NOS SISTEMAS AGROFLORESTAIS CAFEEIROS	57
 Seção 3.....	 63
Benefícios do consórcio do café em SAFs	63
3.1. MICROCLIMA E SOMBREAMENTO	66
3.2. CICLAGEM DE NUTRIENTES E FERTILIDADE DO SOLO	68
3.3. BIODIVERSIDADE FUNCIONAL E CONTROLE BIOLÓGICO NOS SISTEMAS AGROFLORESTAIS	70
3.4. RENDA E SEGURANÇA ALIMENTAR.....	73
3.5. CONECTIVIDADE DA PAISAGEM E SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS	76
3.6. DENOMINAÇÃO DE ORIGEM, PAGAMENTO POR SERVIÇOS AMBIENTAIS E VALORIZAÇÃO TERRITORIAL	82
 Seção 4.....	 89
Escolha das espécies e manejo	89
4.1. CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DAS ESPÉCIES	90
4.2. ESPÉCIES ARBÓREAS UTILIZADAS NOS SAFs CAFEEIROS.....	92
4.3. ARRANJOS ESPACIAIS E DENSIDADE DE PLANTIO	94
4.4. MANEJO DA PODA E CONDUÇÃO DAS ÁRVORES	97
 Seção 5.....	 102
Desafios na implantação	102
5.1. CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO E RETORNO ECONÔMICO	106
5.2. ASSISTÊNCIA TÉCNICA E CAPACITAÇÃO DOS PRODUTORES	108
5.3. COMERCIALIZAÇÃO, CERTIFICAÇÃO E ACESSO AOS MERCADOS.....	111
5.4. BARREIRAS CULTURAIS E POLÍTICAS PÚBLICAS.....	113
 Seção 6.....	 118
Termodinâmica, fluxos de energia e sustentabilidade nos SAFs	118

Seção 7.....	128
---------------------	------------

Nichos ecológicos, complementariedade funcional e resiliência nos SAFs	128
---	------------

Seção 8.....	139
---------------------	------------

Estudo de caso: Sítio Relíquia do Caparaó	139
--	------------

8.1. QUEM PODE PARTICIPAR DO PROGRAMA REFLORESTAR?	143
8.2. QUAIS OS BENEFÍCIOS DO PROGRAMA REFLORESTAR?	146
8.3. CARACTERIZAÇÃO DA PROPRIEDADE	149
8.4. DESENHO DO SISTEMA AGROFLORESTAL	151
8.5. DELINEAMENTO PARA IMPLANTAÇÃO DO PROGRAMA REFLORESTAR	152
8.6. RESULTADOS OBTIDOS COM O PROGRAMA REFLORESTAR.....	153
8.7. INDICADORES AMBIENTAIS	157
8.7.1. Biodiversidade e diversidade funcional.....	160
8.7.2. Qualidade física, química e biológica do solo.....	163
8.7.3. Conservação da água e infiltração no solo.....	166
8.7.4. Estoque e sequestro de carbono	169
8.7.5. Fauna associada e equilíbrio ecológico	172
8.8. LIÇÕES APRENDIDAS	175
8.9. PERSPECTIVAS FUTURAS	177
8.10. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO ESTUDO DE CASO DO SÍTIO RELÍQUIA DO CAPARAÓ	180

Seção 9.....	183
---------------------	------------

Considerações finais	183
-----------------------------------	------------

10. REFERÊNCIAS.....	186
-----------------------------	------------

Resumo

A cafeicultura contemporânea enfrenta desafios crescentes relacionados às mudanças climáticas, à degradação dos recursos naturais, à necessidade de conservação da biodiversidade e à busca por sistemas produtivos capazes de conciliar produtividade e sustentabilidade. Nesse contexto, esta obra apresenta uma abordagem integrada da cafeicultura agroflorestal, fundamentada nos princípios da agroecologia, da ecologia de ecossistemas e da agricultura sintrópica, discutindo os processos ecológicos que sustentam o funcionamento dos Sistemas Agroflorestais (SAFs) aplicados ao cultivo do café. São abordados temas relacionados à sucessão ecológica, aos fluxos de energia, à complementariedade funcional dos nichos ecológicos, à ciclagem de nutrientes, à conservação do solo e da água, à biodiversidade funcional e aos serviços ecossistêmicos responsáveis por aumentar a estabilidade e a resiliência dos agroecossistemas cafeeiros. A obra também discute critérios para seleção de espécies, planejamento e manejo dos SAFs, bem como os principais desafios técnicos e institucionais associados à sua implantação. Como aplicação prática dos conceitos apresentados, desenvolve-se um estudo de caso no Sítio Relíquia do Caparaó, localizado em Divino de São Lourenço, Espírito Santo, evidenciando a implantação de um Sistema Agroflorestal associado ao Programa Reflorestar e seus efeitos sobre a recuperação da cobertura vegetal, a conservação do solo e da água, a ampliação da biodiversidade e o fortalecimento dos processos ecológicos que sustentam a produção cafeeira. Conclui-se que os Sistemas Agroflorestais constituem uma estratégia promissora para integrar produção agrícola e conservação ambiental, promovendo agroecossistemas mais resilientes, regenerativos e adaptados aos desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela sustentabilidade da cafeicultura.

Palavras-chave: Agroecologia. Sistemas Agroflorestais. Cafeicultura agroflorestal. Serviços ecossistêmicos. Sustentabilidade. Biodiversidade.

Introdução

A cafeicultura ocupa posição estratégica entre as atividades agropecuárias de maior relevância econômica, social e ambiental no mundo. O café figura entre as *commodities* agrícolas mais comercializadas internacionalmente, movimentando uma extensa cadeia produtiva que envolve milhões de produtores, cooperativas, indústrias, exportadores e consumidores distribuídos em todos os continentes. Além de seu expressivo valor econômico, a cultura do café desempenha papel fundamental na geração de emprego e renda, especialmente em países tropicais, onde constitui importante instrumento de desenvolvimento regional e inclusão social (FAO, 2024; *International Coffee Organization*, 2024).

O Brasil mantém, há mais de um século, a liderança mundial na produção e exportação de café, consolidando-se também como o segundo maior mercado consumidor da bebida. A cafeicultura brasileira distribui-se por diferentes regiões produtoras, abrangendo ambientes edafoclimáticos bastante diversificados e permitindo o cultivo de duas espécies de grande importância econômica: *Coffea arabica* L. e *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner. Essa diversidade confere elevada competitividade ao setor cafeeiro nacional, que alia volume de produção, qualidade dos grãos e crescente reconhecimento internacional de cafés especiais (Ferrão *et al.*, 2019; CONAB, 2025).

No contexto brasileiro, a atividade apresenta expressiva relevância social. Estima-se que aproximadamente 330 mil propriedades cultivem café no país, sendo a agricultura familiar responsável por cerca de 78% desse total. A cadeia produtiva gera milhões de empregos diretos e indiretos, abrangendo desde a produção de mudas até o processamento, a industrialização, a comercialização e a exportação dos grãos. Em diversos municípios brasileiros, particularmente nas regiões Sudeste e Nordeste, a cafeicultura constitui a principal atividade econômica, contribuindo decisivamente para a manutenção das populações no meio rural e para o fortalecimento das economias locais (Ferrão *et al.*, 2019; CONAB, 2025).

No estado do Espírito Santo, essa importância torna-se ainda mais evidente. Reconhecido como o maior produtor brasileiro de café conilon e um dos principais produtores nacionais de café arábica, o estado possui uma cafeicultura fortemente vinculada à agricultura familiar, caracterizada por pequenas e médias propriedades distribuídas em diferentes regiões fisiográficas. A atividade representa parcela significativa do Produto Interno Bruto (PIB) agropecuário estadual, desempenhando papel estratégico na geração de emprego, renda e desenvolvimento territorial (Incaper, 2025).

Apesar de sua expressiva importância econômica, a cafeicultura contemporânea enfrenta desafios cada vez mais complexos. As mudanças climáticas, a maior frequência de eventos meteorológicos extremos, a degradação dos recursos naturais, a redução da biodiversidade, a volatilidade dos mercados agrícolas e as crescentes exigências relacionadas à rastreabilidade e à sustentabilidade vêm modificando profundamente o cenário da produção cafeeira mundial. Ao mesmo tempo, a necessidade de ampliar a produção de alimentos para atender ao crescimento populacional impõe o desafio de produzir mais, utilizando menos recursos naturais e reduzindo os impactos ambientais da agricultura (IPCC, 2023; FAO, 2024).

Esses desafios ultrapassam os limites da cafeicultura e refletem uma preocupação global relacionada à segurança alimentar, à conservação da biodiversidade e à estabilidade dos ecossistemas. Estimativas da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura indicam que a demanda mundial por alimentos continuará crescendo nas próximas décadas, exigindo sistemas produtivos capazes de conciliar produção agrícola, conservação ambiental e sustentabilidade dos agroecossistemas (FAO, 2022; FAO, 2024). Nesse contexto, torna-se cada vez mais evidente que a sustentabilidade da agricultura dependerá da capacidade de integrar processos ecológicos ao manejo produtivo, reduzindo a dependência de insumos externos e fortalecendo a resiliência dos agroecossistemas (Altieri, 2012; Gliessman, 2015; Souza *et al.*, 2026d).

Na cafeicultura, essas transformações tornam-se particularmente relevantes diante da elevada sensibilidade do cafeeiro às alterações de temperatura e disponibilidade hídrica. Estudos realizados nas últimas décadas

demonstram que o aumento das temperaturas médias, a irregularidade das precipitações e a ocorrência de secas prolongadas afetam diretamente a fenologia das plantas, a produtividade, a qualidade dos grãos e a distribuição geográfica das áreas aptas ao cultivo, tornando indispensável o desenvolvimento de estratégias de adaptação capazes de reduzir a vulnerabilidade dos sistemas produtivos (Pezzopane *et al.*, 2010; Souza *et al.*, 2012; Rezende *et al.*, 2014; IPCC, 2023; Salvador *et al.*, 2025).

Os resultados observados na safra de 2025 ilustram esse cenário. As respostas contrastantes apresentadas pelos cultivos de café arábica e café conilon evidenciam que diferentes sistemas produtivos respondem de maneira distinta às condições ambientais, reforçando a necessidade de estratégias de manejo capazes de mitigar os efeitos das anomalias térmicas e hídricas (CONAB, 2026). Nesse contexto, a análise comparativa apresentada na Figura 1 sintetiza as principais vulnerabilidades observadas para ambas as espécies e destaca a crescente importância de práticas que promovam maior estabilidade microclimática e resiliência dos agroecossistemas cafeeiros.

ARÁBICA		CONILON	
35,7 Milhões scs	Volume Produzido	20,7 Milhões scs	
-9,7% ↓	Trajectoria YoY	+42,1% ↑	
24,1 scs/ha	Produtividade Média	55,9 scs/ha	
Ciclo de Bienalidade Negativa e energia direcionada à sobrevivência	Fator Biológico	Forte recuperação do vigor vegetativo pós-estresse de 2024	
Forte estiagem e intenso veranico na fase crítica de granação	Fator Climático Primário	Resiliência genética aliada à blindagem por irrigação suplementar	
Enquanto o Arábica pagou um "imposto duplo" (biológico e climático), o Conilon alcançou índices recordes de eficiência impulsionado por tecnologia genética e hídrica.			

Figura 1. Matriz de diagnóstico climático: arábica *versus* conilon (Safra 2025).
Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), a partir de dados da CONAB (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A interpretação da Figura 1 evidencia que a vulnerabilidade dos sistemas cafeeiros não depende exclusivamente da espécie cultivada, mas da forma como

o agroecossistema é estruturado e manejado. Embora o café conilon apresente maior tolerância às elevadas temperaturas quando comparado ao café arábica, ambas as espécies encontram limites fisiológicos diante da intensificação dos eventos climáticos extremos. Assim, a capacidade de adaptação da cafeicultura passa a depender cada vez mais da adoção de sistemas produtivos capazes de regular o microclima, conservar os recursos naturais e ampliar a estabilidade ecológica das áreas cultivadas (Pezzopane *et al.*, 2010; Rezende *et al.*, 2014; IPCC, 2023).

Nas últimas décadas, esse entendimento promoveu uma importante mudança de paradigma na agricultura. Durante grande parte do século XX, o aumento da produtividade esteve fortemente associado à simplificação dos sistemas agrícolas, caracterizada pela expansão dos monocultivos, elevada mecanização e crescente utilização de fertilizantes minerais, agrotóxicos e outros insumos externos. Embora esse modelo tenha contribuído significativamente para elevar a produção mundial de alimentos, também intensificou diversos problemas ambientais, incluindo degradação dos solos, redução da biodiversidade, contaminação dos recursos hídricos, fragmentação das paisagens naturais e aumento das emissões de gases de efeito estufa (MEA, 2005; Rockström *et al.*, 2009; FAO, 2024; Malaquias *et al.*, 2024).

Na cafeicultura, esses impactos tornam-se particularmente evidentes em sistemas conduzidos exclusivamente a pleno sol, nos quais a redução da diversidade biológica limita a oferta de serviços ecossistêmicos essenciais ao equilíbrio do agroecossistema. A simplificação estrutural favorece oscilações microclimáticas mais intensas, reduz a infiltração e o armazenamento de água no solo, diminui a atividade biológica, compromete a ciclagem de nutrientes e aumenta a dependência de fertilizantes e defensivos agrícolas. Como consequência, os sistemas tornam-se mais vulneráveis aos eventos climáticos extremos e às flutuações econômicas decorrentes da elevação dos custos de produção (Altieri, 2012; Tscharrntke *et al.*, 2012; Gliessman, 2015; Souza *et al.*, 2026d).

Em contraposição a esse modelo, a agroecologia propõe compreender a propriedade rural como um sistema ecológico complexo, no qual solo, água, vegetação, fauna, microrganismos e atividade humana estabelecem relações

permanentes de interdependência. Sob essa perspectiva, a sustentabilidade deixa de ser resultado da simples substituição de insumos químicos por alternativas biológicas e passa a depender da reorganização dos processos ecológicos responsáveis pelo funcionamento do agroecossistema. Diversidade biológica, sucessão ecológica, ciclagem de nutrientes, complementariedade funcional entre espécies, conservação dos recursos naturais e fortalecimento das interações ecológicas constituem os principais fundamentos dessa abordagem (Altieri, 2012; Gliessman, 2015; Wezel *et al.*, 2020).

É nesse contexto que os Sistemas Agroflorestais (SAFs) assumem papel de destaque. Ao integrarem espécies arbóreas, culturas agrícolas e, em alguns casos, componentes pecuários, esses sistemas procuram reproduzir parte da estrutura e do funcionamento dos ecossistemas florestais naturais. A maior diversidade de espécies promove diferentes estratos vegetais, amplia a interceptação da radiação solar, favorece a infiltração de água, intensifica a ciclagem de nutrientes e cria condições ambientais mais estáveis para o desenvolvimento das plantas cultivadas. Como consequência, observa-se aumento da biodiversidade funcional, maior eficiência no uso dos recursos naturais e redução da dependência de insumos externos (Nair, 1993; Jose, 2009; Altieri, 2012; Silva *et al.*, 2021).

Além dos benefícios agronômicos, os SAFs desempenham importante papel na oferta de serviços ecossistêmicos. Polinização, controle biológico de pragas, conservação do solo, regulação do ciclo hidrológico, sequestro de carbono, manutenção da biodiversidade e conectividade da paisagem constituem processos ecológicos que beneficiam simultaneamente a produção agrícola e a conservação ambiental. Esses serviços representam um dos principais diferenciais dos SAFs em relação aos sistemas convencionais, demonstrando que biodiversidade e produtividade não são objetivos conflitantes, mas componentes complementares de um mesmo sistema produtivo (MEA, 2005; IPBES, 2019; FAO, 2024; Gomes *et al.*, 2025).

No caso específico do cafeeiro, essa integração apresenta relevância ainda maior. Originário do sub-bosque das florestas tropicais da Etiópia, o café arábica desenvolveu-se evolutivamente sob condições naturais de sombreamento parcial, elevada umidade atmosférica e intensa interação com diferentes

espécies vegetais. Essa característica explica sua elevada adaptação aos SAFs, nos quais o componente arbóreo contribui para reduzir temperaturas extremas, diminuir a evapotranspiração, melhorar o balanço hídrico das plantas e favorecer a qualidade física, química e sensorial dos grãos (DaMatta, 2004; Lunz, 2006; Rodrigues; Souza, 2025).

Esses benefícios tornam-se ainda mais evidentes quando comparados aos efeitos do cultivo convencional sob elevada exposição solar. A Figura 2 sintetiza esse contraste, ilustrando como a reorganização ecológica promovida pelos SAFs contribui para reduzir o estresse fisiológico das plantas, ampliar a estabilidade microclimática e fortalecer a resiliência dos agroecossistemas cafeeiros frente às mudanças climáticas.

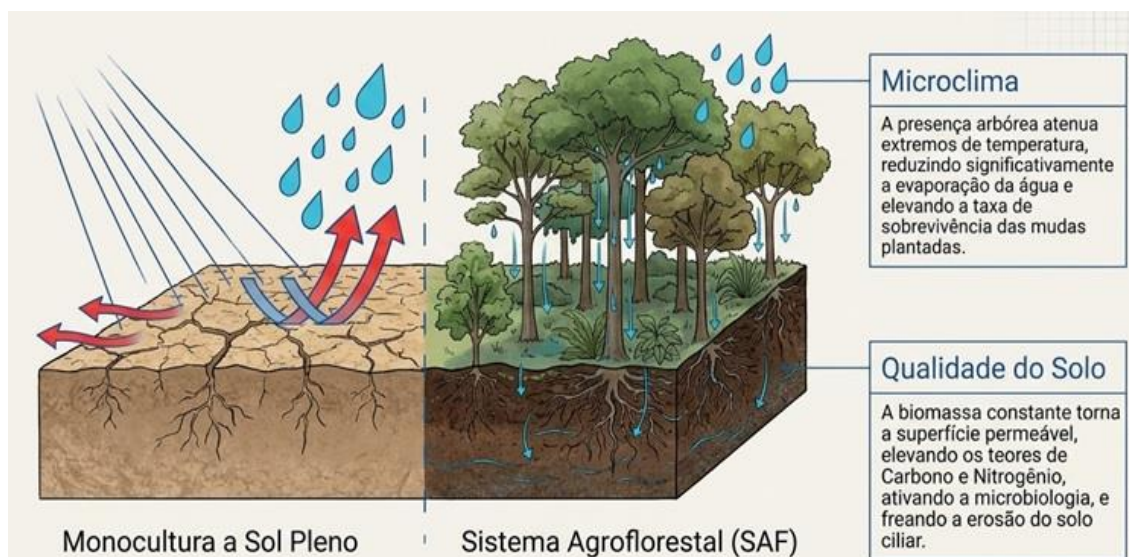


Figura 2. Contraste termohidrológico: estresse fisiológico no monocultivo *versus* resiliência ecossistêmica em Sistema Agroflorestal (SAF). Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Os benefícios ilustrados na Figura 2 não decorrem apenas da presença de árvores no sistema produtivo, mas da reorganização ecológica proporcionada pelos Sistemas Agroflorestais. A melhoria do microclima, a redução do estresse fisiológico das plantas, o aumento da estabilidade ambiental e o fortalecimento da resiliência dos agroecossistemas resultam de uma complexa rede de interações entre solo, vegetação, microrganismos, fauna e atmosfera, cuja dinâmica se aproxima daquela observada nos ecossistemas florestais naturais.

Nesse contexto, a eficiência dos SAFs está diretamente relacionada à compreensão dos processos ecológicos que governam o funcionamento desses ecossistemas. A dinâmica da sucessão ecológica, a ocupação complementar dos nichos ecológicos, a estratificação vertical da vegetação, a facilitação entre espécies e os fluxos de energia e matéria constituem mecanismos fundamentais para explicar a elevada estabilidade observada nos sistemas biodiversos. Sob essa perspectiva, os SAFs deixam de representar simples consórcios agrícolas e passam a ser compreendidos como agroecossistemas complexos, nos quais as interações biológicas assumem papel central na manutenção da produtividade e da sustentabilidade ao longo do tempo (Altieri, 2012; Gliessman, 2015; Odum; Barrett, 2021).

Compreender esses mecanismos torna-se essencial para interpretar por que sistemas biodiversos apresentam maior estabilidade ecológica e eficiência produtiva do que modelos agrícolas simplificados. Essa perspectiva constitui o fundamento conceitual dos capítulos seguintes, nos quais são discutidos os processos ecológicos, energéticos e funcionais responsáveis pela elevada sustentabilidade dos Sistemas Agroflorestais aplicados à cafeicultura.

Entretanto, a consolidação dos SAFs não depende apenas da introdução do componente arbóreo nas lavouras. Sua eficiência está diretamente relacionada à compreensão dos processos ecológicos que governam o funcionamento dos ecossistemas naturais. A dinâmica da sucessão ecológica, a ocupação complementar dos nichos ecológicos, a estratificação vertical da vegetação, a facilitação entre espécies e os fluxos de energia e matéria constituem mecanismos fundamentais para explicar a elevada estabilidade observada nos sistemas biodiversos. Sob essa perspectiva, os SAFs deixam de representar simples consórcios agrícolas e passam a ser compreendidos como agroecossistemas complexos, nos quais as interações biológicas assumem papel central na manutenção da produtividade e da sustentabilidade ao longo do tempo (Altieri, 2012; Odum; Gliessman, 2015; Barrett, 2021).

Essa abordagem amplia significativamente o conceito tradicional de manejo agrícola. A produção deixa de ser interpretada apenas como resultado da aplicação de tecnologias ou insumos externos e passa a depender da eficiência com que o sistema captura, transforma e conserva energia. Sob a ótica da

termodinâmica aplicada aos ecossistemas, ambientes com maior diversidade estrutural apresentam maior capacidade de dissipar energia, reciclar nutrientes, utilizar a radiação solar de forma mais eficiente e reduzir perdas associadas à degradação dos recursos naturais. Consequentemente, tornam-se mais resilientes diante das perturbações ambientais e mais eficientes na utilização dos recursos disponíveis (Odum, 1988; Odum; Barrett, 2021).

Da mesma forma, a teoria dos nichos ecológicos demonstra que espécies com diferentes exigências ambientais podem coexistir de maneira complementar, reduzindo a competição direta pelos recursos disponíveis e aumentando a eficiência global do sistema. Nos SAFs, árvores, cafeeiros, espécies adubadeiras, plantas de cobertura e organismos do solo exploram diferentes estratos, profundidades e períodos de utilização dos recursos, promovendo maior aproveitamento da luz, da água e dos nutrientes. Essa complementariedade funcional constitui um dos principais fundamentos ecológicos responsáveis pela elevada estabilidade desses sistemas (Begon; Townsend; Harper, 2007; Ricklefs; Relyea, 2016; Silva *et al.*, 2021).

Sob essa perspectiva, a biodiversidade deixa de representar apenas um indicador de conservação ambiental para assumir papel estratégico na sustentabilidade da produção agrícola. Quanto maior a diversidade de organismos e de interações ecológicas presentes no agroecossistema, maior tende a ser sua capacidade de resistir e recuperar-se frente às perturbações ambientais. Essa propriedade, denominada resiliência ecológica, constitui um dos principais atributos dos SAFs e explica sua crescente utilização como estratégia de adaptação às mudanças climáticas em diferentes regiões produtoras de café (Walker; Salt, 2006; IPBES, 2019).

Os benefícios decorrentes dessa reorganização ecológica ultrapassam os limites da propriedade rural. A conservação da vegetação nativa, a implantação de corredores ecológicos, a recuperação de áreas degradadas e a adoção de SAFs contribuem para fortalecer a conectividade da paisagem, favorecer o deslocamento da fauna, ampliar a oferta de serviços ecossistêmicos e melhorar a qualidade ambiental em escala regional. Esses processos tornam-se particularmente relevantes em biomas altamente fragmentados, como a Mata Atlântica, onde a integração entre produção agrícola e conservação ambiental

representa um dos maiores desafios para o desenvolvimento sustentável (MEA, 2005; Metzger, 2009; SOS Mata Atlântica; INPE, 2024).

Além dos benefícios ambientais, observa-se crescente reconhecimento da importância dos serviços ecossistêmicos proporcionados pelos sistemas produtivos sustentáveis. Instrumentos como o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), as certificações socioambientais e as Indicações Geográficas demonstram que a conservação dos recursos naturais pode ser incentivada por políticas públicas e mecanismos de valorização territorial. No Caparaó Capixaba, por exemplo, a Denominação de Origem (DO) dos cafés especiais e a implantação do Programa Reflorestar evidenciam como iniciativas institucionais podem contribuir, de forma integrada, para a conservação ambiental, a adoção de práticas agroecológicas e o fortalecimento da sustentabilidade da cafeicultura regional (MEA, 2005; Brasil, 2021; INPI, 2021; Schuler *et al.*, 2022; Reflorestar ES, 2023).

A experiência desenvolvida no Sítio Relíquia do Caparaó constitui uma demonstração prática dos princípios discutidos ao longo desta obra. Ao integrar cafeeiros, espécies florestais e estratégias conservacionistas em uma propriedade inserida no Programa Reflorestar, o estudo de caso evidencia que a sustentabilidade não resulta da adoção isolada de tecnologias, mas da construção gradual de agroecossistemas fundamentados nos processos ecológicos. Os resultados observados durante a implantação do SAF demonstram que a recuperação ambiental pode caminhar de forma integrada com a produção cafeeira, promovendo melhorias na cobertura vegetal, na conservação do solo e da água, na biodiversidade funcional e na resiliência do agroecossistema frente às mudanças climáticas.

Dessa forma, este livro foi concebido para integrar diferentes fundamentos científicos aplicados à cafeicultura agroflorestal. Ao longo dos capítulos, o leitor encontrará discussões sobre os princípios da agroecologia, da ecologia de ecossistemas e da agricultura sintrópica, os processos de sucessão ecológica, a biodiversidade funcional, os serviços ecossistêmicos, os critérios para seleção e manejo de espécies, os desafios relacionados à implantação dos SAFs e, por fim, um estudo de caso desenvolvido no Sítio Relíquia do Caparaó, no qual os

conceitos apresentados são analisados em uma experiência prática de implantação de um SAF cafeeiro.

Assim, mais do que apresentar técnicas de manejo ou modelos de cultivo, esta obra propõe uma reflexão sobre o papel da cafeicultura na construção de paisagens multifuncionais, capazes de integrar produção de alimentos, conservação da biodiversidade, mitigação das mudanças climáticas, fortalecimento da agricultura familiar e valorização dos territórios rurais. Nesse contexto, os Sistemas Agroflorestais são apresentados não apenas como alternativa tecnológica, mas como uma estratégia capaz de harmonizar produção agrícola, processos ecológicos e desenvolvimento sustentável.

✓ **Objetivo da obra**

Este livro tem como objetivo analisar os fundamentos científicos, os processos ecológicos e as estratégias de implantação dos Sistemas Agroflorestais aplicados à cafeicultura, evidenciando seu potencial para promover serviços ecossistêmicos, ampliar a biodiversidade, aumentar a resiliência dos agroecossistemas e contribuir para a construção de sistemas cafeeiros mais sustentáveis, tendo como referência o estudo de caso desenvolvido no Sítio Relíquia do Caparaó.

Fundamentos agroecológicos do SAF com café

Os Sistemas Agroflorestais (SAFs) aplicados à cafeicultura baseiam-se em princípios agroecológicos voltados à integração entre produção agrícola, conservação ambiental e sustentabilidade dos recursos naturais. Segundo Martinelli (2018), Andrade *et al.* (2020) e Schuler *et al.* (2022), esses sistemas são estruturados sobre quatro fundamentos centrais: a diversificação de espécies, a estratificação vertical da vegetação, a sucessão ecológica planejada e a reciclagem de nutrientes, elementos que favorecem maior equilíbrio ecológico e estabilidade produtiva.

Além desses princípios, de acordo com Mendonça *et al.* (2026), a complexidade dos SAFs demanda uma abordagem integrada que ultrapassa a dimensão estritamente biológica. Nesse contexto, a compreensão dos SAFs pode ser organizada em quatro pilares interdependentes, estrutural, funcional, ecológico e socioeconômico, que permitem analisar de forma integrada os componentes e processos responsáveis pelo desempenho desses sistemas (Figura 3).

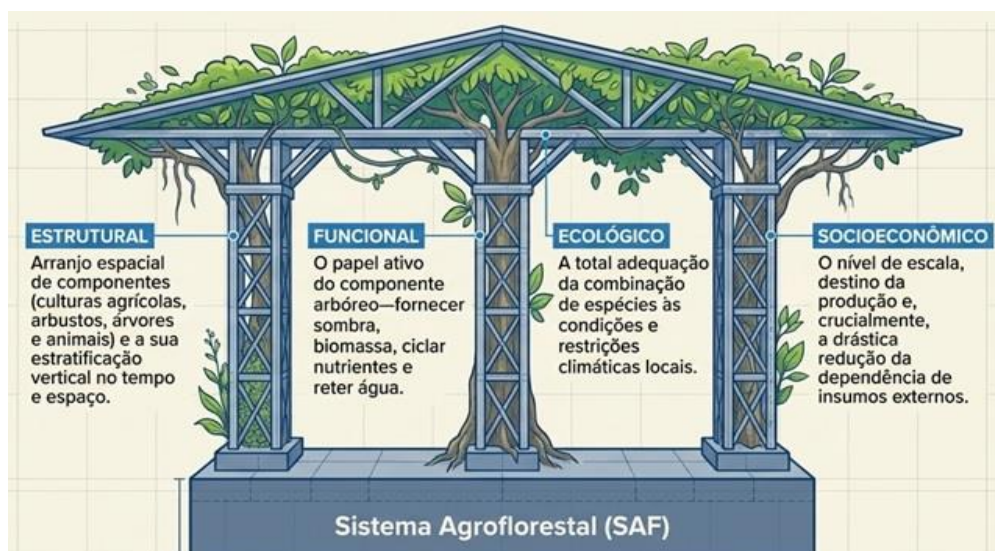


Figura 3. Matriz multidimensional dos SAFs: pilares estruturais, funcionais, ecológicos e socioeconômicos. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Conforme sintetizado na Figura 3, o pilar estrutural, relacionado à organização espacial e ao arranjo das espécies; o funcional, associado à provisão de serviços ecossistêmicos; o ecológico, voltado à conservação da biodiversidade e ao equilíbrio ambiental; e o socioeconômico, responsável por assegurar a viabilidade econômica, a diversificação da renda e a segurança alimentar das famílias produtoras (Mendonça *et al.*, 2026).

A diversificação de espécies constitui um dos principais componentes dos SAFs, uma vez que favorece a estabilidade ecológica do agroecossistema, reduzindo a incidência de pragas e doenças e ampliando a biodiversidade funcional (Gliessman, 2021). A presença de diferentes espécies vegetais também contribui para a melhoria das interações ecológicas e para o fortalecimento dos mecanismos naturais de controle biológico. Esse arranjo biodiverso rompe com a homogeneidade espacial e temporal das monoculturas, criando barreiras físicas e ecológicas que dificultam a dispersão de fitopatógenos e fitófagos, ao mesmo tempo em que fornece habitat e recursos alimentares alternativos para polinizadores e predadores topo (Altieri; Nicholls, 2020; Souza, 2026a).

Outro princípio relevante, vinculado diretamente ao pilar estrutural, é a estratificação vertical das plantas, caracterizada pela organização das espécies em diferentes estratos de altura (emergente, alto, médio e baixo). Esse arranjo permite maior eficiência no aproveitamento da radiação solar, da água e dos nutrientes disponíveis no ambiente, além de favorecer a formação de um microclima mais equilibrado para o desenvolvimento da cultura do café. No sub-bosque agroflorestal, o dossel superior atua como um filtro regulador da intensidade luminosa e da temperatura termofílica, mitigando os efeitos do estresse hídrico e térmico sobre o cafeeiro, o que estabiliza as taxas fotossintéticas e protege a lavoura contra extremos climáticos (Souza *et al.*, 2023; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

A sucessão natural planejada representa a condução do sistema produtivo de forma semelhante aos processos ecológicos observados nas florestas naturais. Nesse modelo, as espécies são implantadas considerando seus ciclos de crescimento e suas funções ecológicas, promovendo maior estabilidade

ambiental e recuperação gradual da fertilidade do solo (Figura 4) (Miconl *et al.*, 2020; Bighi *et al.*, 2024).

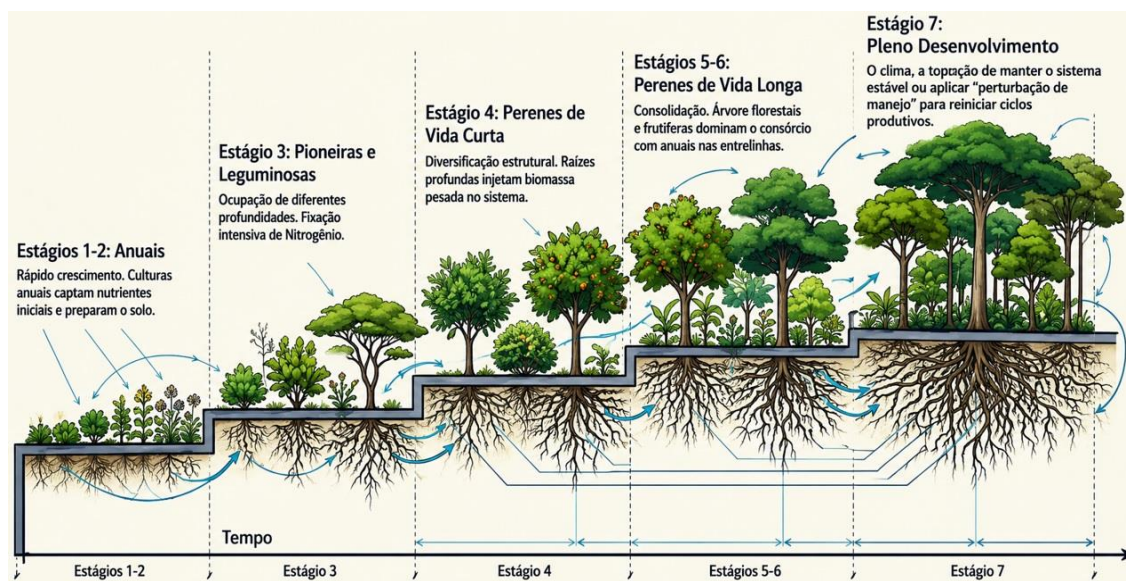


Figura 4. Dinâmica temporal e funcional: os estágios da sucessão natural planejada no agroecossistema. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A introdução estratégica de consórcios temporários de plantas pioneiras e secundárias acelera a transição ecológica do agroecossistema: ao cumprirem seus ciclos vitais, essas espécies preparam o nicho ecológico e modificam as propriedades físico-químicas do solo para o estabelecimento pleno das espécies clímax e das culturas de interesse econômico em longo prazo (Miconl *et al.*, 2020; Bighi *et al.*, 2024).

Além disso, a reciclagem de nutrientes desempenha papel fundamental na sustentabilidade dos SAFs, pois prioriza o aproveitamento da biomassa vegetal e da matéria orgânica produzida no próprio sistema. A deposição constante de folhas, galhos e resíduos provenientes do manejo de podas periódicas sobre o solo favorece a ciclagem de nutrientes, aumenta o teor de matéria orgânica, melhora a retenção de umidade e reduz de forma drástica a necessidade de insumos externos. Esse aporte contínuo de fitobiomassa estimula a atividade da macro e microbiota do solo, acelerando a mineralização de elementos essenciais e promovendo a formação de agregados estáveis, fundamentais para a

conservação da água e proteção contra processos erosivos (Nunes *et al.*, 2022; Egidio; Souza, 2025; Souza, 2026b).

Dessa forma, os princípios agroecológicos que orientam os SAFs contribuem para aumentar a resiliência dos sistemas agrícolas frente às mudanças climáticas, à degradação ambiental e às oscilações produtivas, promovendo maior sustentabilidade econômica, social e ecológica da cafeicultura. Ao mimetizar a complexidade dos ecossistemas naturais, esses arranjos deixam de ser meros cenários de cultivo e passam a atuar como ferramentas ativas de conservação dos recursos hídricos e edáficos. Em última análise, a transição para sistemas biodiversos consolida uma matriz produtiva de baixo carbono, capaz de assegurar a viabilidade econômica do produtor diante das instabilidades do mercado global, sem comprometer a integridade dos serviços ecossistêmicos essenciais para o futuro da atividade cafeeira (Jose, 2009; Altieri, 2012; Wezel *et al.*, 2020; IPCC, 2023).

2.1 Princípios da agroecologia aplicados aos sistemas agroflorestais

A agroecologia constitui uma abordagem científica, prática e sociopolítica que aplica os princípios da Ecologia ao planejamento, ao manejo e à avaliação de agroecossistemas sustentáveis. Diferentemente dos modelos agrícolas convencionais, fundamentados na simplificação biológica e na elevada dependência de insumos externos, a agroecologia propõe a construção de sistemas produtivos capazes de reproduzir, na medida do possível, a organização, a diversidade e o funcionamento dos ecossistemas naturais. Sob essa perspectiva, os SAFs representam uma das mais completas expressões da aplicação dos princípios agroecológicos à agricultura, uma vez que integram espécies arbóreas, culturas agrícolas e, em muitos casos, componentes animais em um mesmo espaço produtivo, estabelecendo interações ecológicas capazes de promover estabilidade, eficiência biológica e sustentabilidade em longo prazo (Altieri, 2012; Gliessman, 2021).

A base conceitual da agroecologia parte do reconhecimento de que os agroecossistemas não devem ser compreendidos como ambientes artificiais isolados da natureza, mas como ecossistemas manejados pelo ser humano.

Consequentemente, seu funcionamento depende das mesmas leis ecológicas que regulam florestas, savanas e demais ecossistemas naturais. Fluxos de energia, ciclagem de nutrientes, sucessão ecológica, relações interespecíficas, dinâmica das populações e conservação da biodiversidade constituem processos fundamentais para a manutenção da produtividade agrícola e da estabilidade ambiental (Odum; Barrett, 2020).

Nesse contexto, Gliessman (2021) destaca que a transição agroecológica fundamenta-se na substituição gradual da dependência de insumos externos pela intensificação dos processos ecológicos internos ao sistema produtivo. Em vez de corrigir continuamente os desequilíbrios ambientais mediante fertilizantes sintéticos, agrotóxicos ou mecanização intensiva, procura-se fortalecer os mecanismos naturais de autorregulação, aumentando a capacidade do agroecossistema de manter sua produtividade por meio das interações biológicas estabelecidas entre seus componentes.

Entre os princípios centrais da agroecologia destaca-se a diversificação biológica, considerada um dos principais fatores responsáveis pela estabilidade dos sistemas agrícolas. Em ambientes biodiversos, diferentes espécies vegetais exploram nichos ecológicos distintos, reduzindo a competição direta pelos recursos e aumentando a eficiência no aproveitamento da luz, da água e dos nutrientes disponíveis. Além disso, a maior heterogeneidade estrutural favorece o estabelecimento de comunidades mais complexas de microrganismos, artrópodes, aves e mamíferos, ampliando a oferta de serviços ecossistêmicos como polinização, controle biológico, decomposição da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes (Perfecto; Vandermeer, 2010; Altieri; Nicholls, 2020).

Na cafeicultura agroflorestal, esse princípio manifesta-se pela associação do cafeeiro com árvores nativas, espécies frutíferas, leguminosas fixadoras de nitrogênio e plantas de cobertura. O resultado é a formação de um agroecossistema estruturalmente semelhante às florestas tropicais, no qual diferentes estratos vegetais ocupam posições complementares ao longo do perfil vertical. Essa organização espacial reduz a incidência direta da radiação solar sobre o cafeeiro, melhora o microclima, aumenta a infiltração de água no solo e favorece a manutenção da biodiversidade funcional, fatores diretamente

relacionados ao incremento da resiliência produtiva e da qualidade dos grãos (Jose, 2009; Souza *et al.*, 2023).

Outro princípio fundamental corresponde à intensificação das sinergias ecológicas. Nos SAFs, as relações entre os diferentes organismos deixam de ser predominantemente competitivas e passam a assumir caráter complementar. Árvores profundas redistribuem nutrientes das camadas inferiores do solo para a superfície por meio da deposição de folhas e galhos; leguminosas enriquecem naturalmente o sistema com nitrogênio atmosférico; plantas floríferas oferecem recursos alimentares para polinizadores e inimigos naturais; enquanto fungos micorrízicos ampliam significativamente a eficiência de absorção de água e nutrientes pelas raízes do cafeeiro. Essas interações positivas reduzem a necessidade de fertilizantes minerais e defensivos químicos, promovendo maior eficiência ecológica e econômica do sistema produtivo (Nair, 2011; Gliessman, 2021).

A reciclagem de biomassa constitui outro processo essencial dentro da lógica agroecológica. Em ecossistemas florestais maduros, praticamente todos os nutrientes permanecem circulando continuamente entre a vegetação, a serapilheira e o solo. Os SAFs procuram reproduzir essa dinâmica por meio da manutenção permanente da cobertura vegetal, da utilização dos resíduos provenientes das podas e da decomposição contínua da matéria orgânica. Esse processo favorece o aumento dos teores de carbono orgânico, melhora a estrutura física do solo, amplia sua capacidade de retenção de água e estimula intensamente a atividade biológica, tornando o ambiente mais resiliente frente aos períodos de estiagem e aos eventos climáticos extremos (Young, 1997; Nunes *et al.*, 2022).

Sob a ótica da Ecologia de Ecossistemas, os SAFs também apresentam elevada eficiência energética. Enquanto sistemas agrícolas simplificados demandam grandes quantidades de energia externa incorporada na forma de fertilizantes, agrotóxicos e combustíveis fósseis, os SAFs utilizam de maneira mais eficiente a energia solar incidente, convertendo-a em biomassa distribuída entre diferentes estratos vegetais. Essa maior eficiência na captura, armazenamento e redistribuição de energia aumenta a produtividade ecológica

do sistema e reduz significativamente sua dependência de recursos não renováveis (Odum; Barrett, 2020).

Outro aspecto central da agroecologia refere-se à promoção da resiliência. Em sistemas biodiversos, a existência de múltiplas espécies desempenhando funções ecológicas semelhantes reduz a vulnerabilidade diante de perturbações ambientais. Caso determinada espécie seja afetada por pragas, doenças ou eventos climáticos extremos, outras passam a desempenhar funções equivalentes, mantendo o funcionamento do agroecossistema. Esse fenômeno, conhecido como redundância funcional, constitui um dos principais mecanismos responsáveis pela elevada estabilidade observada nos sistemas agroflorestais quando comparados aos monocultivos convencionais (Walker, 1992; Altieri, 2012; Carvalho *et al.*, 2021; Souza, 2026e).

Além dos benefícios ecológicos, a agroecologia incorpora uma dimensão social frequentemente negligenciada pelos modelos produtivistas convencionais. O conhecimento construído pelas famílias agricultoras passa a ser reconhecido como elemento estratégico para o manejo sustentável dos agroecossistemas. A seleção de espécies, o calendário agrícola, as técnicas de poda, a condução da sucessão vegetal e o manejo da fertilidade do solo resultam da interação entre conhecimentos científicos e saberes tradicionais acumulados ao longo de gerações. Essa integração fortalece a autonomia dos agricultores, reduz a dependência tecnológica e contribui para a construção de sistemas produtivos mais adaptados às condições locais (Leff, 2002; Caporal; Costabeber, 2004; Souza, 2026e).

Na cafeicultura, a aplicação desses princípios transcende os aspectos estritamente agronômicos. Ao favorecer a conservação dos recursos hídricos, a proteção do solo, o incremento da biodiversidade funcional, a melhoria das condições microclimáticas e a diversificação das fontes de renda, os Sistemas Agroflorestais consolidam-se como instrumentos estratégicos para a adaptação da atividade cafeeira às mudanças climáticas e às crescentes exigências relacionadas à sustentabilidade. Nessa perspectiva, a agroecologia deixa de representar apenas um conjunto de práticas de manejo e passa a constituir um novo paradigma para a organização dos sistemas agrícolas, fundamentado na valorização dos processos ecológicos como principal fonte de produtividade,

estabilidade, resiliência e conservação ambiental (Jose, 2009; Altieri, 2012; Gliessman, 2015; Wezel *et al.*, 2020; IPCC, 2023).

Essa compreensão fornece a base conceitual para o entendimento da ecologia dos SAFs, tema abordado no próximo item, no qual serão discutidos os mecanismos ecológicos responsáveis pelo funcionamento, pela autorregulação e pela elevada capacidade adaptativa desses agroecossistemas.

2.2. Ecologia dos sistemas agroflorestais

A Ecologia constitui a base científica sobre a qual se fundamentam os SAFs modernos. Enquanto a agronomia convencional historicamente concentrou seus esforços na maximização da produtividade de culturas isoladas, a Ecologia de Ecossistemas demonstra que a estabilidade e a produtividade em longo prazo resultam da interação contínua entre organismos vivos, recursos naturais e processos físicos que regulam o funcionamento dos ambientes naturais. Sob essa perspectiva, um SAF não deve ser compreendido apenas como um arranjo de árvores associadas ao cafeeiro, mas como um ecossistema agrícola complexo, aberto e dinâmico, cuja eficiência depende da organização das relações ecológicas estabelecidas entre seus diferentes componentes (Odum; Barrett, 2020; Gliessman, 2021).

Essa concepção representa uma mudança paradigmática em relação aos modelos agrícolas convencionais. Nas monoculturas, a simplificação biológica reduz drasticamente o número de espécies presentes na área cultivada, tornando o sistema altamente dependente de fertilizantes minerais, pesticidas e mecanização intensiva para manter sua produtividade. Nos SAFs ocorre o processo inverso: a diversidade biológica substitui parte dos insumos externos, passando a desempenhar funções ecológicas que anteriormente eram supridas artificialmente. Dessa forma, fertilidade do solo, controle biológico, ciclagem de nutrientes, regulação microclimática e conservação hídrica deixam de depender exclusivamente da intervenção humana e passam a ser sustentados pelo próprio funcionamento do agroecossistema (Jose, 2009; Altieri, 2012).

Essa capacidade de autorregulação decorre da elevada complexidade estrutural dos SAFs. Em Ecologia, sistemas complexos caracterizam-se pela

presença de numerosos componentes interligados, cujas interações produzem propriedades emergentes que não podem ser explicadas pela simples análise isolada de cada elemento. Assim, a produtividade, a estabilidade ecológica e a resiliência observadas nos SAFs resultam da interação simultânea entre árvores, cafeeiros, plantas espontâneas, microrganismos, artrópodes, aves, mamíferos, atmosfera, solo e recursos hídricos, formando uma rede integrada de processos ecológicos (Capra, 1996; Odum; Barrett, 2020; Wezel *et al.*, 2020).

Essa visão sistêmica aproxima-se da Teoria Geral dos Sistemas, proposta por Bertalanffy (1975), segundo a qual sistemas vivos apresentam organização hierárquica, retroalimentação (*feedback*), auto-organização e elevado grau de interdependência entre seus componentes. Aplicada à cafeicultura agroflorestal, essa abordagem permite compreender que alterações em um único componente do sistema repercutem sobre toda a rede ecológica. A introdução de uma nova espécie arbórea, por exemplo, modifica o regime de sombreamento, altera o microclima, influencia a atividade dos polinizadores, modifica a dinâmica da serapilheira, interfere na microbiota do solo e, conseqüentemente, afeta o crescimento, a produtividade e a qualidade do cafeeiro.

Sob essa perspectiva, o conceito de nicho ecológico assume papel central na organização dos SAFs. Diferentemente do conceito clássico de habitat, que corresponde ao local onde determinada espécie vive, o nicho ecológico representa o conjunto de funções desempenhadas por essa espécie dentro do ecossistema, incluindo sua forma de utilização dos recursos disponíveis e suas relações com os demais organismos (Begon; Townsend; Harper, 2007). Nos SAFs, diferentes espécies vegetais ocupam nichos distintos quanto à exploração da luz, da água, dos nutrientes e do espaço físico, reduzindo a competição direta e favorecendo a complementariedade funcional.

Na cafeicultura agroflorestal, essa diferenciação torna-se evidente quando espécies arbóreas de grande porte convivem com o cafeeiro sem comprometer seu desenvolvimento. Árvores emergentes interceptam parte da radiação solar incidente e reduzem a temperatura do ambiente; espécies de porte intermediário promovem a produção contínua de biomassa; leguminosas fixadoras de nitrogênio enriquecem naturalmente o solo; frutíferas diversificam a produção; enquanto o cafeeiro ocupa o estrato inferior, onde encontra condições

microclimáticas semelhantes às existentes em seu ambiente natural de origem. Essa distribuição funcional reduz a sobreposição de nichos ecológicos e amplia significativamente a eficiência do sistema no aproveitamento dos recursos disponíveis (Nair, 2011; Souza *et al.*, 2023).

Entretanto, a coexistência entre espécies não ocorre apenas pela redução da competição. Nos Sistemas Agroflorestais predominam relações ecológicas de facilitação, nas quais uma espécie modifica o ambiente de forma a favorecer o estabelecimento, o crescimento ou a sobrevivência de outra. Esse conceito, amplamente consolidado na Ecologia contemporânea, descreve interações positivas capazes de aumentar o desempenho de organismos vizinhos por meio da melhoria das condições físicas, químicas e biológicas do ambiente, desempenhando papel fundamental na estruturação e na estabilidade das comunidades vegetais (Callaway, 1995; Brooker *et al.*, 2008).

Na cafeicultura agroflorestal, diversos exemplos ilustram esse mecanismo. Árvores sombreadoras reduzem a amplitude térmica diária, diminuem a evapotranspiração e aumentam a umidade relativa do ar, criando condições mais favoráveis ao cafeeiro durante períodos de elevadas temperaturas. Simultaneamente, espécies arbóreas com sistemas radiculares profundos absorvem nutrientes das camadas inferiores do solo, redistribuindo-os para a superfície por meio da queda de folhas, flores e galhos, enriquecendo continuamente a camada superficial explorada pelas raízes absorventes do café. Plantas floríferas fornecem recursos alimentares permanentes para polinizadores e inimigos naturais, aumentando a biodiversidade funcional do sistema e reduzindo naturalmente a incidência de organismos-praga (Perfecto; Vandermeer, 2010; Altieri; Nicholls, 2020).

Esse conjunto de interações positivas conduz ao conceito de complementariedade funcional, considerado um dos principais mecanismos responsáveis pela elevada produtividade ecológica dos sistemas biodiversos. Em vez de competirem pelos mesmos recursos, diferentes espécies exploram recursos distintos ou os utilizam em momentos diferentes do tempo, aumentando a eficiência global do sistema. A complementariedade manifesta-se tanto na arquitetura aérea quanto no sistema radicular. Enquanto árvores exploram camadas profundas do perfil do solo, o cafeeiro concentra grande parte de suas

raízes absorventes nas camadas superficiais, reduzindo significativamente a competição por água e nutrientes. Da mesma forma, diferentes épocas de floração distribuem a oferta de recursos ao longo do ano, sustentando populações estáveis de polinizadores e outros organismos benéficos (Jose, 2009; Gliessman, 2021; Gomes *et al.*, 2025).

A compreensão desses mecanismos demonstra que a elevada produtividade dos SAFs não resulta da maximização do desempenho individual de cada espécie, mas do aperfeiçoamento das relações ecológicas estabelecidas entre todos os componentes do sistema. Em outras palavras, o sucesso da cafeicultura agroflorestal depende menos da escolha isolada das espécies e mais da forma como essas espécies interagem ao longo do espaço e do tempo. Essa visão integrada constitui um dos principais diferenciais da agroecologia em relação aos modelos agrícolas convencionais, nos quais a produtividade é frequentemente interpretada apenas como consequência do aumento dos insumos aplicados ao sistema (Silva *et al.*, 2021).

Ao reconhecer que cooperação, complementariedade e diversidade constituem processos tão importantes quanto competição e produtividade, a Ecologia oferece a base conceitual para compreender por que os SAFs apresentam maior estabilidade ambiental, maior eficiência no uso dos recursos naturais e maior capacidade de adaptação frente às mudanças climáticas (Odum; Barrett, 2007; Altieri, 2012; Gliessman, 2015). Esses mecanismos tornam-se ainda mais evidentes quando se analisam a organização espacial dos diferentes estratos vegetais, os fluxos de energia, as redes tróficas e os serviços ecossistêmicos gerados pelos SAFs (Costanza *et al.*, 1997; Gama-Rodrigues; Gama-Rodrigues, 2008).

A organização espacial dos organismos representa um dos atributos ecológicos mais importantes dos SAFs. Diferentemente das monoculturas, cuja arquitetura é essencialmente bidimensional e composta por indivíduos pertencentes a uma única espécie distribuídos uniformemente sobre a superfície do solo, os SAFs apresentam elevada heterogeneidade estrutural, reproduzindo parte da complexidade observada nas florestas tropicais naturais. Essa organização tridimensional amplia a eficiência ecológica do sistema ao permitir que diferentes espécies ocupem simultaneamente posições complementares no

espaço, explorando recursos ambientais de forma mais equilibrada e reduzindo a competição direta (Jose, 2009; Odum; Barrett, 2020).

Essa disposição vertical da vegetação, denominada estratificação vertical, constitui um dos pilares do funcionamento ecológico dos SAFs. Nos ambientes florestais distinguem-se, de forma geral, quatro grandes estratos: emergente, dossel superior, sub-bosque e estrato herbáceo. Cada um desses compartimentos apresenta condições particulares de luminosidade, temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e disponibilidade hídrica, determinando nichos ecológicos específicos para diferentes grupos de organismos (Richards, 1996; Begon; Townsend; Harper, 2007; DaMatta *et al.*, 2019).

Na cafeicultura agroflorestal, essa arquitetura é reproduzida por meio da associação planejada entre espécies arbóreas de diferentes portes e o cafeeiro, cuja origem evolutiva está intimamente relacionada ao sub-bosque das florestas africanas. Assim, árvores emergentes exercem função predominante na interceptação da radiação solar e na proteção contra ventos; espécies de porte intermediário regulam o microclima e produzem elevada quantidade de biomassa; frutíferas diversificam a produção e fornecem alimento à fauna; enquanto o cafeeiro ocupa o estrato inferior, onde encontra condições ambientais mais próximas daquelas sob as quais a espécie evoluiu naturalmente (DaMatta; Ramalho, 2006; Souza *et al.*, 2023).

Do ponto de vista biofísico, essa organização modifica profundamente o balanço energético do agroecossistema. Parte significativa da radiação incidente é interceptada pelo dossel superior antes de atingir o cafeeiro, reduzindo o aquecimento excessivo das folhas e do solo. A diminuição da temperatura foliar reduz as taxas de transpiração, preserva o potencial hídrico das plantas e aumenta a eficiência do uso da água, particularmente durante períodos de elevada demanda evaporativa. Paralelamente, a maior cobertura vegetal eleva a umidade relativa do ar, reduz a velocidade dos ventos e estabiliza a amplitude térmica diária, formando um microclima significativamente mais favorável ao crescimento e à produção do cafeeiro (Lin, 2007; Charbonnier *et al.*, 2017).

Sob a perspectiva da termodinâmica ecológica, os SAFs podem ser compreendidos como sistemas de elevada eficiência na captura e utilização da energia solar. Conforme demonstrado por Odum (1988), ecossistemas maduros

tendem a maximizar o aproveitamento da energia disponível por meio da diversificação estrutural e funcional. Nos SAFs, diferentes estratos vegetais interceptam comprimentos de onda distintos e em diferentes alturas, aumentando a eficiência fotossintética global do sistema quando comparada às monoculturas. Em vez de concentrar toda a produção de biomassa em uma única espécie, a energia solar é convertida simultaneamente em madeira, frutos, sementes, folhas, raízes, serapilheira e matéria orgânica do solo, elevando a produtividade ecológica total do agroecossistema.

A eficiência ecológica dos SAFs também decorre da intensa circulação de matéria entre seus componentes. Folhas, flores, frutos e galhos provenientes das árvores constituem fluxo permanente de biomassa para a superfície do solo, formando uma espessa camada de serapilheira que atua como interface entre vegetação e ambiente edáfico. Durante o processo de decomposição, macrofauna, fungos e bactérias convertem essa matéria orgânica em nutrientes prontamente disponíveis para as plantas, estabelecendo um ciclo biogeoquímico contínuo que reduz significativamente as perdas por lixiviação e minimiza a necessidade de fertilizantes externos (Young, 1997; Lavelle *et al.*, 2006; Souza *et al.*, 2023).

2.3. Sucessão ecológica e agricultura sintrópica nos sistemas agroflorestais cafeeiros

A sucessão ecológica constitui um dos processos fundamentais responsáveis pela organização, estabilidade e evolução dos ecossistemas naturais. Trata-se de um fenômeno dinâmico por meio do qual comunidades biológicas modificam progressivamente a estrutura física e funcional do ambiente, promovendo mudanças graduais na composição das espécies, na disponibilidade de recursos e na complexidade ecológica ao longo do tempo. Nos SAFs, a compreensão desses mecanismos permite transformar a sucessão natural em uma ferramenta de planejamento e manejo, aproximando os agroecossistemas da dinâmica observada nas florestas tropicais (Begon; Townsend; Harper, 2007; Odum; Barrett, 2020).

Sob a perspectiva clássica da Ecologia, a sucessão representa uma sequência ordenada de comunidades vegetais que se estabelecem após uma perturbação ou sobre uma área inicialmente desprovida de vegetação. Ao longo desse processo, espécies pioneiras modificam as condições ambientais, favorecendo o estabelecimento de espécies secundárias e, posteriormente, de espécies tardias ou climáticas. Cada grupo funcional exerce papel específico na construção gradual do ecossistema, alterando propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, regulando o microclima e ampliando a biodiversidade local (Clements, 1916; Odum; Barrett, 2020).

Na agricultura convencional, esses processos naturais são frequentemente interrompidos pelo preparo intensivo do solo, pela eliminação da vegetação espontânea e pela simplificação dos sistemas produtivos. Como consequência, reduz-se a capacidade do agroecossistema de reciclar nutrientes, conservar água, manter comunidades biológicas diversificadas e responder às perturbações ambientais. Os Sistemas Agroflorestais, por sua vez, procuram utilizar a sucessão ecológica como princípio organizador do sistema produtivo, promovendo uma ocupação planejada do espaço e do tempo por diferentes espécies vegetais (Nair, 2011; Gliessman, 2021; Souza *et al.*, 2026d).

Nesse contexto, a sucessão deixa de ser apenas um processo ecológico espontâneo para tornar-se uma estratégia de manejo agrícola. As espécies são selecionadas considerando sua velocidade de crescimento, longevidade, arquitetura, exigências ecológicas e funções desempenhadas no agroecossistema. Dessa forma, plantas pioneiras exercem papel de rápida cobertura do solo, produção de biomassa e melhoria das condições microclimáticas; espécies secundárias promovem maior estabilidade estrutural; enquanto árvores climáticas consolidam o funcionamento ecológico do sistema em longo prazo (Martins; Souza, 2009).

Na cafeicultura agroflorestal, essa lógica apresenta especial importância devido à origem florestal do cafeeiro. As espécies do gênero *Coffea* evoluíram naturalmente no sub-bosque das florestas tropicais africanas, sob condições de luminosidade difusa, elevada umidade relativa do ar e intensa deposição de matéria orgânica. Assim, quando inserido em sistemas que reproduzem parte dessa estrutura ecológica, o cafeeiro encontra condições ambientais mais

próximas de seu nicho evolutivo, favorecendo o equilíbrio fisiológico, a estabilidade produtiva e, frequentemente, a melhoria da qualidade sensorial dos frutos (DaMatta; Ramalho, 2006; DaMatta *et al.*, 2019).

Entretanto, nas últimas décadas, o entendimento da sucessão ecológica aplicada à agricultura sofreu profunda transformação a partir dos trabalhos desenvolvidos por Ernst Götsch, criador da Agricultura Sintrópica. Diferentemente das abordagens convencionais de restauração ecológica, Götsch propõe que a sucessão não seja apenas observada ou respeitada, mas conduzida ativamente pelo agricultor, utilizando podas estratégicas, elevada diversidade de espécies e manejo contínuo da biomassa para acelerar os processos naturais de organização dos ecossistemas (Götsch, 1995; 2013).

A Agricultura Sintrópica baseia-se no princípio de que a natureza evolui continuamente em direção ao aumento da complexidade, da biodiversidade e da eficiência energética. Nesse modelo, cada espécie vegetal exerce funções específicas dentro do sistema, ocupando determinado estrato vertical e temporal. A implantação das culturas ocorre de maneira sincronizada com a sucessão ecológica, permitindo que plantas de ciclos curtos preparem o ambiente para espécies de maior longevidade, ao mesmo tempo em que fornecem alimentos, biomassa e serviços ecossistêmicos durante todo o processo de desenvolvimento do agroecossistema (Götsch, 2013).

Na prática, a sucessão sintrópica organiza o sistema produtivo em diferentes grupos ecológicos. Espécies de ciclo muito curto promovem rápida cobertura do solo e proteção contra a erosão; leguminosas aceleram a fixação biológica de nitrogênio; árvores pioneiras produzem grandes volumes de biomassa destinados à ciclagem de nutrientes; espécies secundárias estabilizam o ambiente; enquanto árvores climácicas passam a constituir a estrutura permanente do sistema. O cafeeiro é inserido nesse contexto ocupando posição intermediária do estrato arbustivo, beneficiando-se do microclima e da fertilidade construídos pelas demais espécies (Götsch, 1995; Altieri, 2012; Gliessman, 2015).

Um dos aspectos mais inovadores da Agricultura Sintrópica refere-se ao papel atribuído às podas. Diferentemente da poda convencional, cujo objetivo principal consiste na condução das plantas, a poda sintrópica atua como

mecanismo ecológico de aceleração da sucessão. A remoção periódica de ramos estimula intenso rebrote vegetativo, aumenta a produção de biomassa e promove contínuo aporte de matéria orgânica ao solo. Esse processo intensifica a atividade biológica, amplia a disponibilidade de nutrientes e favorece a formação de agregados estáveis, contribuindo simultaneamente para o aumento da fertilidade e da capacidade de retenção de água (Andrade; Pasini, 2024).

Sob a ótica da Ecologia de Ecossistemas, a sucessão sintrópica representa um mecanismo de aumento progressivo da complexidade estrutural e funcional dos agroecossistemas. À medida que novas espécies são incorporadas e diferentes estratos vegetais se consolidam, intensificam-se as interações entre plantas, microrganismos, artrópodes, aves e mamíferos, ampliando a biodiversidade funcional do sistema. Como consequência, consolidam-se redes ecológicas cada vez mais complexas, responsáveis pela polinização, pelo controle biológico de pragas, pela decomposição da matéria orgânica, pela ciclagem de nutrientes e pela manutenção de diversos serviços ecossistêmicos. Esses processos contribuem para reduzir gradativamente a dependência de insumos externos, aumentar a eficiência ecológica e fortalecer a estabilidade e a resiliência dos agroecossistemas cafeeiros (Jose, 2009; Gliessman, 2015; IPBES, 2019; Odum; Barrett, 2021).

Na cafeicultura, essa dinâmica traduz-se em benefícios agronômicos expressivos. A maior cobertura vegetal reduz a amplitude térmica diária, protege o solo contra impactos diretos das chuvas, aumenta a infiltração de água, reduz processos erosivos e melhora as condições fisiológicas do cafeeiro durante períodos de déficit hídrico. Paralelamente, a diversificação produtiva proporciona novas fontes de renda provenientes da produção de frutas, madeira, sementes, mel, produtos florestais não madeireiros e serviços ambientais, fortalecendo a sustentabilidade econômica das propriedades rurais (Jose, 2009; Gliessman, 2015; Charbonnier *et al.*, 2017).

Além dos benefícios ecológicos e econômicos, a sucessão planejada favorece a adaptação dos sistemas produtivos às mudanças climáticas. Agroecossistemas estruturalmente complexos apresentam maior capacidade de absorver perturbações sem perder suas funções ecológicas essenciais, característica conhecida como resiliência. Dessa forma, a sucessão ecológica

deixa de representar apenas uma etapa da dinâmica florestal e passa a constituir uma estratégia de planejamento agrícola capaz de integrar produção, conservação ambiental e desenvolvimento rural sustentável (Folke, 2006; Altieri, 2012; Gliessman, 2015).

Em síntese, compreender a sucessão ecológica e os fundamentos da Agricultura Sintrópica permite interpretar os SAFs não como simples associações de culturas, mas como ecossistemas em permanente construção. O agricultor deixa de atuar apenas como produtor de alimentos e passa a exercer o papel de condutor dos processos ecológicos, estimulando a evolução da biodiversidade e potencializando os serviços ecossistêmicos que sustentam a produtividade do sistema. Essa visão representa uma das maiores contribuições da agroecologia para a agricultura contemporânea e constitui um dos alicerces da cafeicultura agroflorestal moderna, cuja organização conceitual é sintetizada na Figura 5.

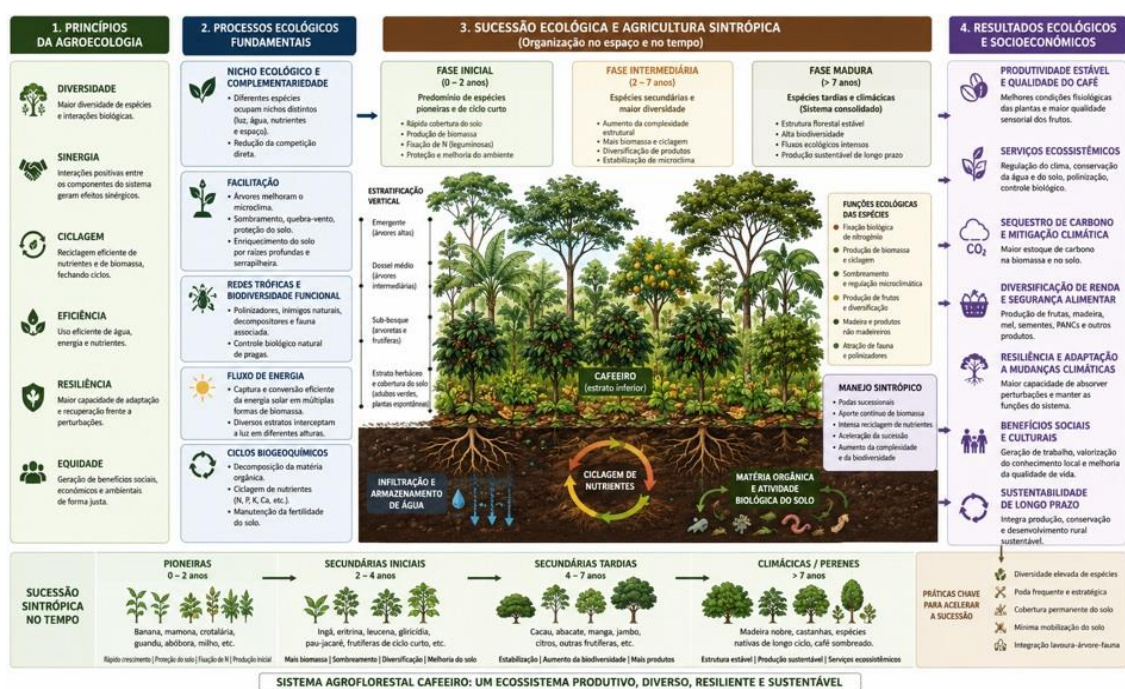


Figura 5. Organização ecológica dos sistemas agroflorestais cafeeiros: dos princípios agroecológicos à sucessão sintrópica. Fonte: Elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (ChatGPT).

A Figura 5 sintetiza os principais fundamentos ecológicos que sustentam o funcionamento dos SAFs cafeeiros, evidenciando que sua elevada estabilidade

não resulta da simples associação entre árvores e culturas agrícolas, mas da integração de processos ecológicos que atuam de forma simultânea e complementar. Princípios agroecológicos, relações ecológicas, sucessão vegetal, estratificação da vegetação, manejo sintrópico e biodiversidade funcional constituem elementos indissociáveis de um mesmo sistema, responsável por aumentar a eficiência ecológica, a resiliência e a sustentabilidade da produção cafeeira.

A compreensão integrada desses mecanismos permite reconhecer que os benefícios observados nos SAFs decorrem da atuação sinérgica entre os diferentes componentes do agroecossistema, refletindo-se na melhoria das condições microclimáticas, na conservação do solo e da água, na ciclagem de nutrientes, na estabilidade produtiva e na oferta de serviços ecossistêmicos. A partir dessa base conceitual, o capítulo seguinte analisa, de forma detalhada, os principais benefícios proporcionados pelo consórcio do café em SAFs, demonstrando como esses processos ecológicos se traduzem em vantagens agronômicas, ambientais, econômicas e sociais para a cafeicultura.

Seção 3

Benefícios do consórcio do café em SAFs

O cultivo consorciado do café em SAFs apresenta importantes benefícios agronômicos, ambientais, sociais e econômicos, configurando-se como uma alternativa sustentável ao modelo convencional de monocultivo. A integração entre cafeeiros e espécies arbóreas favorece o equilíbrio ecológico do sistema produtivo, promovendo maior eficiência no uso dos recursos naturais e contribuindo para a sustentabilidade da atividade agrícola (Martins *et al.*, 2022; Mendonça *et al.*, 2026). Entre os principais benefícios dos SAFs destaca-se a melhoria da qualidade e da fertilidade do solo.

A melhoria da qualidade do solo constitui um dos primeiros efeitos observados em SAFs bem manejados. Diferentemente da monocultura convencional, na qual a simplificação biológica tende a intensificar processos de degradação, os SAFs promovem mecanismos naturais de regeneração que fortalecem a fertilidade, a ciclagem de nutrientes e a estabilidade do agroecossistema.

A superioridade ecológica dos Sistemas Agroflorestais decorre, sobretudo, da substituição de processos lineares de exploração dos recursos naturais por ciclos biológicos de regeneração e reciclagem. Enquanto os sistemas convencionais tendem a intensificar a degradação do solo, aumentar a dependência de insumos externos e reduzir a biodiversidade funcional, os SAFs estimulam mecanismos naturais capazes de recuperar a fertilidade, conservar os recursos naturais e fortalecer a resiliência do agroecossistema (Jose, 2009; Altieri, 2012; Gliessman, 2015). Essa diferença entre os dois modelos de produção pode ser compreendida de forma integrada por meio da comparação dos processos ecológicos que caracterizam cada sistema, conforme sintetizado na Figura 5.

A deposição contínua de resíduos vegetais, como folhas, galhos e restos culturais, aumenta os teores de matéria orgânica e intensifica a ciclagem de nutrientes, favorecendo a atividade biológica e reduzindo a necessidade de

fertilizantes externos. Além disso, a cobertura vegetal permanente contribui para a conservação da umidade, diminui a compactação e reduz os processos erosivos (Gonçalves *et al.*, 2025; Souza *et al.*, 2026b). Essa dinâmica contrapõe o ciclo virtuoso de regeneração dos SAFs ao ciclo vicioso de degradação da monocultura convencional.



Figura 5. Comparativo de ciclos de cultivo: o ciclo vicioso da monocultura *versus* o ciclo virtuoso dos SAFs. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Outro aspecto relevante refere-se à conservação dos recursos hídricos e à regulação microclimática. A presença de diferentes estratos vegetais proporciona sombreamento parcial aos cafeeiros, reduzindo a temperatura do ambiente e a evapotranspiração excessiva. Esse microclima mais equilibrado contribui para minimizar os efeitos do estresse hídrico e das variações climáticas extremas, aumentando a resiliência da cultura frente às mudanças climáticas (Souza; Crespo; Silva, 2023; Mendonça *et al.*, 2026).

Os SAFs favorecem a biodiversidade funcional e a diversificação produtiva, promovendo interações ecológicas que auxiliam no controle biológico natural de pragas e doenças e reduzindo a dependência de defensivos químicos. Simultaneamente, a produção associada de frutas, madeira e espécies nativas amplia as fontes de renda, reduz a vulnerabilidade econômica e fortalece a

segurança alimentar das famílias agricultoras (Souza; Crespo; Silva, 2023; Souza *et al.*, 2025c; Mendonça *et al.*, 2026; Souza, 2026c).

Além disso, os SAFs desempenham papel relevante na recuperação de áreas degradadas, na conservação da biodiversidade e na mitigação dos impactos ambientais associados à agricultura convencional. Entre os serviços ecossistêmicos mais relevantes desses sistemas, destaca-se sua capacidade de atuar como sumidouros de carbono, promovendo o sequestro e o armazenamento de carbono na biomassa vegetal e no solo (Souza, 2018; Malaquias *et al.*, 2024; Souza *et al.*, 2025c; Souza *et al.*, 2026) (Figura 6).

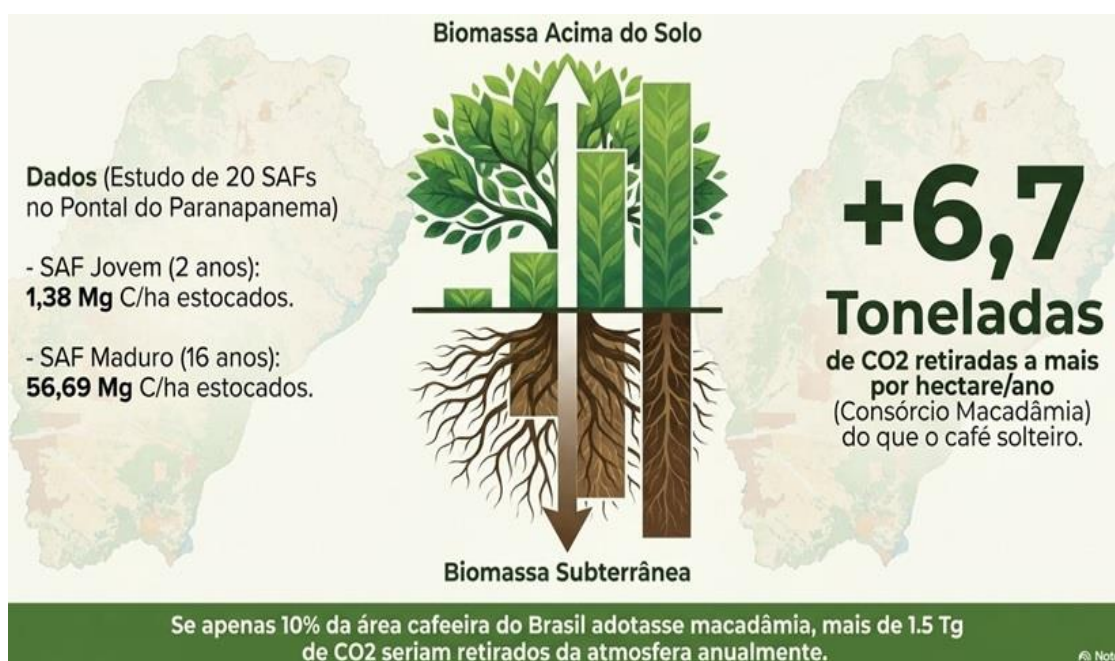


Figura 6. Evolução temporal do estoque de carbono (C) e taxa anual de mitigação de CO₂ em Sistemas Agroflorestais. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Os dados apresentados na Figura 6 evidenciam o potencial incremental dos SAFs na dinâmica de mitigação das mudanças climáticas. Observa-se que, nos estágios iniciais de implantação (aos 2 anos), o estoque de carbono no sistema ainda é reduzido, registrando 1,38 Mg de C ha⁻¹, reflexo do estágio juvenil das espécies arbóreas. Contudo, com o amadurecimento do SAF e o consequente adensamento da biomassa aérea e radicular ao longo de 16 anos, esse valor eleva-se expressivamente para 56,69 Mg de C ha⁻¹. Essa variação temporal na taxa de sequestro é característica de SAFs, onde o potencial de sumidouro de

carbono (*carbon sink*) se expande de forma sigmoide à medida que as espécies arbóreas superam a fase de estabelecimento e atingem o pico de incremento corrente anual em biomassa (Nair *et al.*, 2021).

Esse incremento representa uma taxa líquida de remoção atmosférica de aproximadamente 6,7 toneladas de CO₂ ha ano⁻¹. Na cafeicultura, essa capacidade de retenção de carbono não apenas compensa as emissões inerentes ao manejo do cafezal, mas também transforma o agroecossistema em um sistema carbono-negativo (Tumnebal *et al.*, 2023). Essa *performance* qualifica a atividade para responder às exigências globais de descarbonização e insere a cafeicultura familiar e empresarial nos mercados emergentes de créditos de carbono de base agroecológica, agregando valor ambiental ao produto final (Chetro *et al.*, 2024).

3.1. Microclima e sombreamento

O Brasil destaca-se entre os maiores produtores e exportadores de produtos agropecuários do mundo, condição favorecida por características ambientais e climáticas altamente propícias à produção agrícola. A diversidade de biomas, a elevada incidência solar ao longo do ano e a ampla disponibilidade de áreas agricultáveis contribuem significativamente para o desenvolvimento de diferentes culturas agrícolas em distintas regiões do país (Embrapa, 2023).

Essas condições naturais favorecem tanto o abastecimento do mercado interno quanto a geração de excedentes destinados à exportação, fortalecendo a segurança alimentar e consolidando a relevância estratégica do Brasil no cenário do agronegócio mundial (*ibidem*). Entretanto, as elevadas temperaturas e os períodos de déficit hídrico observados em diversas regiões produtoras representam desafios importantes para a sustentabilidade da cafeicultura, especialmente diante das mudanças climáticas (Salvador *et al.*, 2025).

Nesse contexto, o sombreamento proporcionado pelas espécies arbóreas nos SAFs exerce papel fundamental na regulação do microclima do cafeeiro. A presença das árvores reduz a incidência direta da radiação solar, diminui a temperatura do solo e do ambiente e contribui para a conservação da umidade, reduzindo a evaporação da água e o estresse térmico das plantas.

Além disso, o sombreamento influencia positivamente o desenvolvimento fisiológico do cafeeiro, promovendo uma maturação mais lenta e uniforme dos frutos. Esse processo favorece o acúmulo de açúcares, compostos aromáticos e metabólitos relacionados à qualidade sensorial da bebida, contribuindo para a produção de cafés com características superiores (Embrapa, 2023; Souza; Simão, 2024). Paralelamente aos ganhos qualitativos, a diversificação de espécies no mesmo arranjo espacial maximiza a eficiência do uso da terra e dos insumos, resultando em incremento da produtividade global e da rentabilidade do sistema, como exemplificado pelo consórcio café-macadâmia apresentado na Figura 7.



Figura 7. Desempenho agrônomo e econômico do consórcio café-macadâmia em condições de sequeiro. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Dessa forma, o manejo adequado do sombreamento e a escolha estratégica de espécies consorciadas, como a noqueira-macadâmia apresentada na Figura 7, representam uma abordagem altamente eficiente para aumentar a resiliência da cafeicultura frente às condições climáticas adversas. Os dados demonstram que o aproveitamento da adubação residual do cafeeiro aperfeiçoa o ciclo de desenvolvimento da espécie arbórea, enquanto a segurança produtiva em condições de sequeiro mitiga os riscos econômicos do

produtor. Assim, os SAFs consolidam-se como uma estratégia indispensável para promover ganhos ambientais, produtivos e qualitativos na produção cafeeira moderna.

3.2. Ciclagem de nutrientes e fertilidade do solo

O manejo adequado do solo constitui um dos principais fatores para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, desempenhando papel estratégico na manutenção da produtividade e na conservação dos recursos naturais ao longo do tempo (Matos, 2023). Em sistemas agroecológicos, especialmente nos SAFs, o solo é reconhecido como um sistema vivo, dinâmico e altamente complexo, no qual processos físicos, químicos e biológicos interagem continuamente, influenciando diretamente o equilíbrio ecológico, a ciclagem de nutrientes e a eficiência produtiva do agroecossistema.

De acordo com Doran e Parkin (1994), Sá *et al.* (2025) e Souza *et al.* (2025), a qualidade do solo está associada à sua capacidade de desempenhar funções essenciais dentro do ecossistema, como sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde de plantas, animais e seres humanos. Nesse sentido, a avaliação da qualidade do solo refere-se ao grau em que este consegue atender adequadamente às funções ecológicas e produtivas para as quais é destinado. A escolha do modelo de manejo determina se essas funções serão preservadas ou negligenciadas, criando uma clara divisão entre o manejo extrativista e o regenerativo.

Na cafeicultura contemporânea, essa distinção torna-se particularmente relevante, pois diferentes estratégias de manejo produzem trajetórias contrastantes de evolução da qualidade do solo ao longo do tempo. Enquanto sistemas convencionais tendem a intensificar processos de degradação física, química e biológica quando conduzidos de forma inadequada, abordagens agroecológicas buscam restabelecer os mecanismos naturais de regeneração e conservação dos recursos edáficos (Altieri, 2012; Gliessman, 2015; Lal, 2020). A Figura 8 ilustra essa bifurcação tecnológica na cafeicultura, evidenciando os diferentes impactos dos modelos convencional e agroecológico sobre a qualidade do solo ao longo do tempo.



Figura 8. A bifurcação tecnológica da cafeicultura: impactos no solo entre o modelo convencional e a via agroecológica. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Conforme ilustrado na transição para a via agroecológica (Figura 8), nos SAFs com café, a fertilidade do solo é favorecida pela constante deposição de biomassa vegetal proveniente das árvores e demais espécies consorciadas. A queda contínua de folhas, galhos e resíduos orgânicos sobre a superfície do solo atua como um tamponamento protetor, que aumenta progressivamente os teores de matéria orgânica e intensifica a ciclagem de nutrientes. Esse aporte biológico estimula a macro e a microbiota edáfica, promovendo maior solubilização e disponibilidade nutricional para os cafeeiros, além de estruturar o solo contra processos erosivos. Dessa forma, contrapõe-se o empobrecimento químico e físico observado no modelo convencional por uma dinâmica de autorregulação e fertilidade construída no SAF, intensificada pela ciclagem de nutrientes (Sá *et al.*, 2025; Souza *et al.*, 2025).

Além disso, para esses mesmos autores, a presença contínua de matéria orgânica melhora a estrutura física do solo, favorecendo a agregação das partículas, o aumento da porosidade e a maior capacidade de retenção de água. Esses fatores contribuem para reduzir processos erosivos, minimizar a compactação e aumentar a infiltração hídrica no perfil do solo.

Outro benefício importante refere-se ao estímulo da atividade microbiana. A maior disponibilidade de resíduos orgânicos favorece o desenvolvimento de microrganismos benéficos, responsáveis pela decomposição da matéria orgânica e pela mineralização de nutrientes, promovendo maior equilíbrio biológico e funcionalidade do solo (Bettiol *et al.*, 2023).

Dessa forma, os SAFs contribuem significativamente para a recuperação e manutenção da fertilidade do solo, fortalecendo a sustentabilidade da cafeicultura e reduzindo a dependência de insumos químicos externos. Esse resgate da fertilidade integral decorre da capacidade do sistema em restabelecer os ciclos biogeoquímicos naturais, onde a constante deposição de fitobiomassa alimenta uma teia trófica edáfica altamente ativa.

A bioestrutura do solo, enriquecida por agregados estáveis e matéria orgânica humificada, funciona como um reservatório dinâmico de água e nutrientes, minimizando as perdas por lixiviação e erosão que frequentemente degradam os cafezais a pleno sol. Sob essa perspectiva, o manejo agroflorestal deixa de focar na simples nutrição mineral direta da planta para priorizar a saúde do ecossistema do solo. Como resultado, o fortalecimento dessa matriz biológica edáfica atua como o primeiro nível de defesa da lavoura, criando um ambiente supressivo a patógenos e preparando a base ecológica necessária para o equilíbrio de populações na parte aérea do sistema (Altieri, 2012; Gliessman, 2015; Lal, 2020).

3.3. Biodiversidade funcional e controle biológico nos sistemas agroflorestais

Os SAFs têm se destacado como alternativa sustentável ao modelo agrícola convencional, tanto no campo científico quanto na formulação de políticas públicas voltadas ao desenvolvimento rural sustentável. Esse reconhecimento decorre da capacidade desses sistemas de integrar diferentes espécies vegetais e, em alguns casos, animais, em arranjos produtivos diversificados, promovendo maior equilíbrio ecológico e sustentabilidade ambiental (Souza, 2022).

Além dos benefícios relacionados à conservação do solo e à diversificação produtiva, os SAFs apresentam importante potencial para o controle biológico natural de “pragas”¹ agrícolas. A elevada diversidade de espécies e a complexidade estrutural desses sistemas favorecem a formação de habitats adequados para organismos benéficos, como predadores naturais, parasitoides e polinizadores, contribuindo para a regulação ecológica das populações de insetos-praga (Figura 9).

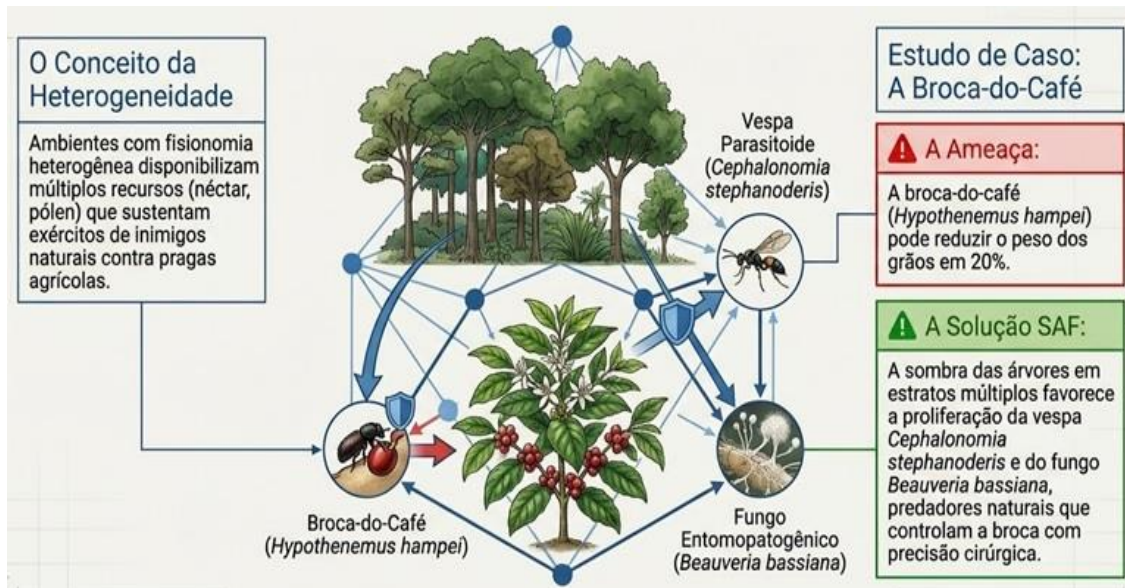


Figura 9. Engenharia ecológica em Sistemas Agroflorestais cafeeiros: mecanismos naturais de regulação da broca-do-café. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Conforme ilustrado na abordagem de engenharia ecológica (Figura 9), o arranjo espacial e a estratificação vertical das espécies arbóreas criam refúgios microclimáticos estáveis e sítios de nidificação para a biodiversidade funcional. No caso específico da broca-do-café, a manutenção da cobertura permanente do solo e o estrato multiestratificado favorecem a proliferação de inimigos naturais, como formigas predadoras, aranhas, vespas parasitoides (como a vespa-de-uganda) e fungos entomopatogênicos benéficos, que atuam sobre o inseto em diferentes estágios de desenvolvimento. Essa arquitetura de SAF

¹ Na agroecologia, considera-se mais apropriado utilizar a expressão “populações de insetos em desequilíbrio ecológico”, por evitar uma interpretação antropocêntrica do ecossistema e reconhecer as interações ecológicas presentes nos agroecossistemas.

promove um equilíbrio dinâmico e duradouro entre os organismos benéficos e os potenciais agentes causadores de danos econômicos, minimizando os prejuízos na produtividade e consolidando a autorregulação do cafezal de base agroecológica (Pinheiro *et al.*, 2024; Viçosi *et al.*, 2026).

Na cafeicultura, essa dinâmica ecológica auxilia no manejo de organismos potencialmente prejudiciais, como o bicho-mineiro (*Leucoptera coffeella*) e a broca-do-café (*Hypothenemus hampei*), reduzindo a necessidade de aplicação de defensivos químicos. A diversidade florística e a complexidade estrutural presentes nos SAFs atuam como barreiras ecológicas que interrompem os ciclos biológicos de pragas e limitam sua dispersão, promovendo a estabilidade do agroecossistema (Pinheiro *et al.*, 2024; Viçosi *et al.*, 2026).

No caso do bicho-mineiro, a redução da incidência populacional em sistemas consorciados está associada à alteração do microclima e à redução da temperatura no dossel, fatores que desaceleram o ciclo reprodutivo do inseto, somados ao incremento expressivo na taxa de parasitoidismo por vespas das famílias Braconidae e Eulophidae, atraídas pela complexidade vegetal (Rezende *et al.*, 2014; Perfecto; Vandermeer, 2015; Venzon *et al.*, 2019).

De forma análoga, a infestação da broca-do-café é mitigada pela abundante presença de inimigos naturais na serapilheira e nos troncos das árvores de sombra, como formigas predadoras e fungos entomopatogênicos, a exemplo de *Beauveria bassiana*, os quais encontram nos SAFs condições favoráveis de umidade e abrigo para exercer o controle biológico espontâneo (Pereira *et al.*, 2022). Além disso, a elevada diversidade vegetal reduz a homogeneidade do ambiente, dificultando a localização e a rápida dispersão dos insetos-praga ao longo da lavoura. Essa maior complexidade estrutural contribui para estabilizar as populações de organismos potencialmente danosos, reduzindo a ocorrência de surtos e favorecendo o equilíbrio ecológico do agroecossistema. Dessa forma, a arquitetura biodiversa do sistema atua como uma ferramenta de manejo ecológico integrada, convertendo o ambiente em um fator de supressão biológica de pragas-chave (Vandermeer *et al.*, 2019).

Assim, os SAFs representam uma estratégia capaz de conciliar produtividade agrícola e conservação ambiental, reduzindo a dependência de insumos químicos externos e fortalecendo os processos ecológicos naturais.

Consequentemente, esses sistemas contribuem para a sustentabilidade dos agroecossistemas cafeeiros e para a promoção de serviços ecossistêmicos essenciais à produção agrícola. Adicionalmente, favorecem a conservação da biodiversidade funcional, aumentam a resiliência ecológica frente às mudanças climáticas e reforçam a capacidade de autorregulação dos sistemas produtivos, aspectos fundamentais para a construção de uma cafeicultura mais sustentável e duradoura (Gliessman, 2015; Souza, 2022).

3.4. Renda e segurança alimentar

Os SAFs configuram-se como uma importante estratégia agroecológica de uso sustentável do solo, integrando diferentes espécies agrícolas, frutíferas, florestais e, em alguns casos, componentes animais em um mesmo arranjo produtivo. Esses sistemas podem ser implantados de forma simultânea ou em sucessão temporal, buscando aperfeiçoar o aproveitamento dos recursos naturais e promover maior equilíbrio ecológico. Entre suas principais modalidades destacam-se os SAFs voltados à geração de renda, aqueles destinados ao autoconsumo e os sistemas que conciliam ambas as finalidades, otimizando a alocação de mão de obra familiar e o fluxo de caixa da propriedade (Rodrigues *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2020; Martins *et al.*, 2022) (Figura 10).

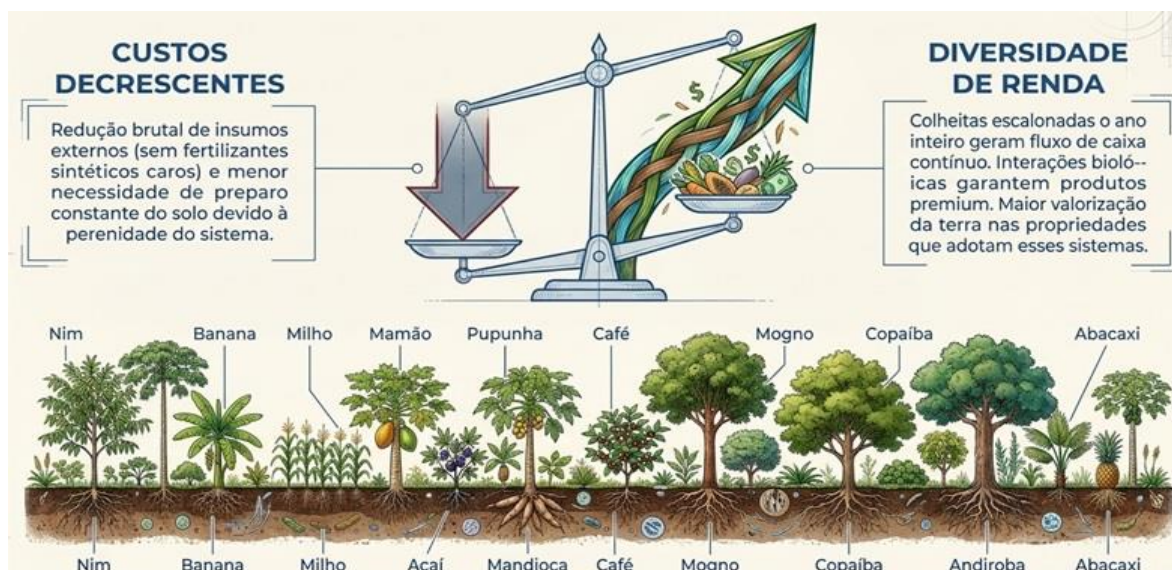


Figura 10. Sinergias entre biodiversidade, diversificação da produção e sustentabilidade econômica em Sistemas Agroflorestais. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Essa complementaridade entre funções produtivas, econômicas e ecológicas evidencia que a sustentabilidade dos agroecossistemas depende de arranjos capazes de conciliar geração de renda, segurança alimentar e conservação ambiental. No contexto da agricultura familiar, os SAFs desempenham papel estratégico na subsistência e na reprodução social das famílias rurais (Altieri, 2020; Silva *et al.*, 2020; Martins *et al.*, 2022; Souza, 2026b).

A diversificação produtiva de base agroecológica proporcionada por esses sistemas amplia a disponibilidade de alimentos ao longo do ano, favorece dietas mais diversificadas e nutritivas e reduz a vulnerabilidade socioeconômica decorrente da dependência de insumos e produtos externos à propriedade. Além disso, ao fortalecer a autonomia da unidade familiar, os SAFs geram externalidades positivas que contribuem para a oferta de importantes serviços ecossistêmicos em escala local, como a conservação da biodiversidade, a proteção do solo, a ciclagem de nutrientes e a regulação hídrica das microbacias (Silva *et al.*, 2020; Martins *et al.*, 2022; Souza, 2026a).

A integração do café com espécies frutíferas, madeireiras, medicinais e nativas possibilita a obtenção de diferentes produtos ao longo do ano, promovendo maior estabilidade econômica para os produtores. Essa diversificação reduz os riscos associados à dependência exclusiva da cafeicultura e cria múltiplas fontes de renda, fortalecendo a resiliência econômica das propriedades rurais. Essa viabilidade deixa de ser apenas conceitual e se materializa em indicadores de engenharia financeira e fluxos de caixa altamente atrativos no longo prazo (*ibidem*).

Além dos benefícios relacionados à diversificação da produção e à redução dos riscos econômicos, a viabilidade dos SAFs pode ser mensurada por indicadores financeiros amplamente utilizados na análise de investimentos rurais. Ferramentas como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o período de retorno do investimento (*payback*) permitem avaliar a rentabilidade e a atratividade econômica desses sistemas em comparação a modelos produtivos convencionais. Os resultados sintetizados na Figura 11 evidenciam o potencial dos SAFs para conciliar sustentabilidade ambiental e desempenho financeiro de longo prazo (Mendonça *et al.*, 2026).



Figura 11. Viabilidade econômica de Sistemas Agroflorestais: fluxo de caixa acumulado, Taxa Interna de Retorno (TIR), Valor Presente Líquido (VPL) e período de retorno do investimento (*payback*). Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), a partir de dados de VERENA/IPÊ, com auxílio de IA (NotebookLM).

Os extraordinários índices financeiros apresentados na Figura 11, com uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 97,1%, retorno do capital investido (*payback*) em apenas dois (2) anos e um Valor Presente Líquido (VPL) de US\$ 36.795 por hectare sob uma taxa de desconto de 11%, demonstram categoricamente que os SAFs não se configuram como projetos de caridade ambiental ou romantismo ecológico. Sob a ótica rigorosa da economia e do fluxo de caixa, os SAFs operam como verdadeiras fábricas biológicas altamente otimizadas e eficientes na mitigação de riscos de mercado. A rápida amortização do investimento inicial decorre da receita antecipada dos componentes de ciclo curto e médio, enquanto o VPL expressivo consolida o sistema como um ativo financeiro superior ao monocultivo convencional, blindando o produtor contra as oscilações de preço das *commodities* (Mendonça *et al.*, 2026).

Outro aspecto relevante, que se soma a essa robustez financeira, refere-se à segurança alimentar das famílias agricultoras. A produção diversificada nos SAFs favorece o acesso contínuo a alimentos frescos e de maior qualidade nutricional, contribuindo para o autoconsumo e para a melhoria das condições

de vida no meio rural. Dessa forma, além da comercialização do café, os produtores podem obter renda complementar por meio da venda de frutas, madeira, sementes, plantas medicinais e outros produtos oriundos do sistema agroflorestal (Rodrigues *et al.*, 2020).

Assim, os SAFs constituem uma alternativa produtiva capaz de associar geração de renda, segurança alimentar e conservação ambiental, fortalecendo os princípios da agroecologia e promovendo maior sustentabilidade socioeconômica para a agricultura familiar. Contudo, a expressão plena desse potencial multifuncional não ocorre de forma aleatória: ela está estritamente condicionada ao planejamento estratégico do agroecossistema.

A harmonização entre a cultura comercial do café e as espécies consorciadas exige critérios técnicos rigorosos de seleção e espacialização, de modo que a cooperação ecológica sobressaia frente à competição por recursos vitais. Torna-se imperativo, portanto, compreender a dinâmica intrínseca de cada componente vegetal introduzido no sistema, balizando a arquitetura da lavoura desde a sua implantação até as intervenções ecofisiológicas continuadas (Götsch, 1995; Gliessman, 2015).

3.5. Conectividade da paisagem e serviços ecossistêmicos

Os benefícios proporcionados pelos SAFs extrapolam os limites da propriedade rural e alcançam escalas mais amplas da paisagem, contribuindo para a conservação da biodiversidade e para a manutenção de serviços ecossistêmicos essenciais ao funcionamento dos agroecossistemas. Segundo Schroth *et al.* (2004) e Lima *et al.* (2022), os SAFs constituem uma importante estratégia para integrar produção agrícola e conservação ambiental, especialmente em regiões submetidas à intensa fragmentação dos ecossistemas naturais. De forma complementar, Gliessman (2021) destaca que os sistemas agroecológicos biodiversos promovem maior estabilidade ecológica ao favorecer interações biológicas complexas e fortalecer os processos naturais de regulação dos agroecossistemas.

Na Mata Atlântica, bioma onde se insere a região do Caparaó, a expansão das atividades agropecuárias promoveu a formação de uma paisagem composta

por fragmentos florestais isolados, frequentemente cercados por áreas agrícolas. Nesse contexto, os SAFs desempenham papel relevante ao aumentar a conectividade ecológica entre os remanescentes de vegetação nativa. De acordo com Perfecto e Vandermeer (2010) e Souza (2026b), sistemas agrícolas biodiversos podem atuar como matrizes de conservação, reduzindo o isolamento dos fragmentos e favorecendo o deslocamento de organismos entre diferentes ambientes. Essa característica torna-se particularmente importante em regiões montanhosas, onde a manutenção da conectividade entre habitats contribui para a conservação da fauna, da flora e dos processos ecológicos associados à dinâmica da paisagem.

A conectividade da paisagem refere-se à capacidade de movimentação da fauna, dispersão de sementes, fluxo gênico e intercâmbio ecológico entre áreas naturais e produtivas. Em sistemas simplificados, caracterizados pelo monocultivo e pela baixa diversidade estrutural, esses fluxos tendem a ser reduzidos, comprometendo processos ecológicos fundamentais. Em contraste, os SAFs promovem uma estrutura vegetacional mais complexa, composta por diferentes estratos e espécies, criando condições favoráveis para aves, mamíferos, insetos polinizadores, inimigos naturais e diversos organismos associados à manutenção da biodiversidade funcional (Forman; Godron, 1986; Altieri, 2012; Lima *et al.*, 2022) (Figura 12).

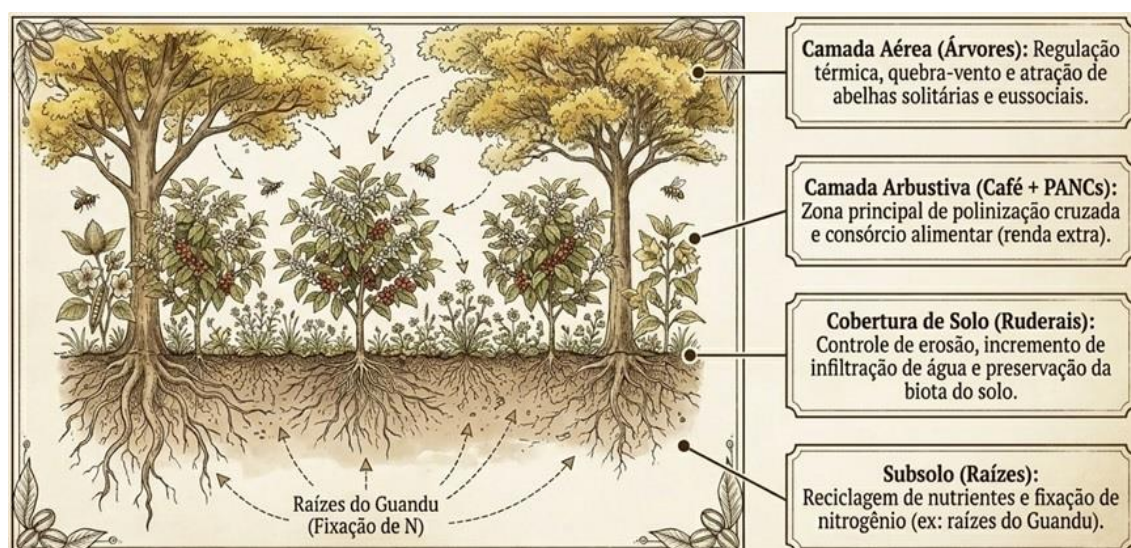


Figura 12. Integração entre biodiversidade funcional, estratificação vegetal e serviços ecossistêmicos em Sistemas Agroflorestais cafeeiros. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A organização espacial dos componentes vegetais nos SAFs favorece a formação de uma estrutura multifuncional capaz de potencializar diversos serviços ecossistêmicos simultaneamente. Conforme ilustrado na Figura 12, a combinação de espécies arbóreas, cafeeiros, fabáceas, plantas ruderais e PANCs amplia a diversidade biológica do sistema, promove diferentes nichos ecológicos e favorece a complementaridade entre os estratos vegetais. Além disso, a diversidade de arquiteturas radiculares contribui para a exploração de diferentes camadas do solo, intensificando a ciclagem de nutrientes, a infiltração de água e a estabilidade física do ambiente (Gomes *et al.*, 2025; Souza, 2026a).

Harvey *et al.* (2008) demonstraram que paisagens agrícolas que incorporam árvores e corredores vegetados apresentam maior riqueza de espécies e melhor capacidade de conservação da fauna silvestre quando comparadas a sistemas convencionais. Da mesma forma, Tscharntke *et al.* (2011) destacam que a diversidade estrutural presente nos SAFs favorece a provisão de múltiplos serviços ecossistêmicos, incluindo polinização, controle biológico, ciclagem de nutrientes, regulação climática e estabilidade ecológica. Esses benefícios ampliam a resiliência dos agroecossistemas e contribuem para reduzir a dependência de insumos externos, fortalecendo a sustentabilidade produtiva da cafeicultura.

Evidências recentes também indicam que a distribuição estratégica de recursos florais na paisagem agrícola pode potencializar esses serviços ecossistêmicos. A denominada “Hipótese Integradora” propõe que faixas floridas e vegetação diversificada funcionam inicialmente como áreas de concentração de polinizadores, especialmente abelhas, que utilizam esses ambientes como fonte permanente de néctar e pólen. À medida que a cultura agrícola entra em floração e passa a oferecer recursos energéticos competitivos, ocorre um processo de transbordamento (*spillover*), no qual esses polinizadores migram para a lavoura comercial, intensificando a polinização e contribuindo para o aumento da produtividade. Essa dinâmica demonstra que habitats complementares não competem com a cultura agrícola, mas atuam como reservatórios ecológicos capazes de sustentar populações de polinizadores ao longo do ciclo produtivo (Garibaldi; Steffan-Dewenter; Winfree, 2013; Souza *et al.*, 2025).

Na cafeicultura, a presença de espécies arbóreas nativas e frutíferas associadas aos cafeeiros contribui para a criação de habitats diversificados e para a oferta contínua de recursos alimentares ao longo do ano. Esse ambiente favorece o estabelecimento de polinizadores, como abelhas nativas sem ferrão e *Apis mellifera*, cuja atuação pode elevar significativamente a produtividade dos cafezais. Simultaneamente, a maior diversidade vegetal favorece a presença de predadores naturais, parasitoides e microrganismos benéficos que auxiliam no controle ecológico de pragas e doenças, reduzindo a necessidade de defensivos químicos e fortalecendo o equilíbrio biológico do sistema (Gomes *et al.*, 2025; Souza *et al.*, 2025).

Estudos recentes desenvolvidos na região do Caparaó demonstram que a biodiversidade funcional presente nos agroecossistemas cafeeiros pode gerar benefícios produtivos expressivos. Ao investigar o potencial de plantas ruderais e Plantas Alimentícias Não Convencionais (PANCs) em sistemas consorciados, pesquisadores do Ifes identificaram 28 espécies com potencial apícola e alimentar capazes de fornecer recursos florais para polinizadores ao longo do ano. Entre as espécies registradas destacam-se o assa-peixe, o urucum, o guandu, o picão-preto e a chanana, que atuam como importantes fontes de néctar e pólen para abelhas e outros insetos benéficos. Nesse contexto, a presença de *Apis mellifera* mostrou-se particularmente relevante, estando associada a incrementos de até 39,2% na produtividade dos cafezais, evidenciando a importância dos serviços ecossistêmicos de polinização para a sustentabilidade econômica da atividade cafeeira (*ibidem*).

Essa mudança de percepção sobre a vegetação espontânea representa uma das transformações conceituais mais relevantes da agroecologia contemporânea. Espécies historicamente classificadas como invasoras ou indesejáveis passam a ser reconhecidas por suas funções ecológicas, produtivas e alimentares, contribuindo para a construção de agroecossistemas mais resilientes e biodiversos.

A incorporação de plantas ruderais e PANCs aos sistemas agroflorestais evidencia que a biodiversidade vegetal exerce funções que transcendem a simples composição florística da paisagem. Essas espécies atuam como elementos estruturantes dos agroecossistemas, fornecendo recursos

alimentares e abrigo para polinizadores, inimigos naturais e outros organismos benéficos, além de contribuir para a conectividade ecológica e para a estabilidade funcional do sistema. A Figura 13 sintetiza essas múltiplas interações, destacando o papel da vegetação espontânea na promoção da biodiversidade funcional e na intensificação dos serviços ecossistêmicos em agroecossistemas cafeeiros.



Figura 13. Plantas ruderais e PANCs como promotoras da biodiversidade funcional e da polinização em agroecossistemas cafeeiros. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Além dos benefícios relacionados à polinização, a manutenção dessas espécies vegetais contribui para a proteção do solo, aumento da matéria orgânica, reciclagem de nutrientes e ampliação da diversidade biológica das propriedades rurais. Conforme ilustrado na Figura 13, essa abordagem representa uma importante superação da chamada “cegueira botânica”, conceito que descreve a tendência de ignorar ou subvalorizar espécies espontâneas que podem desempenhar funções ecológicas essenciais nos agroecossistemas. Ao reconhecer o potencial das plantas ruderais e das PANCs como fornecedoras de recursos para polinizadores, inimigos naturais e organismos do solo, a cafeicultura agroecológica amplia a oferta de serviços ecossistêmicos e fortalece sua sustentabilidade produtiva e ambiental (Gomes *et al.*, 2025).

Os benefícios ecológicos proporcionados pela biodiversidade funcional refletem-se diretamente no desempenho produtivo das lavouras. Estudos

conduzidos por esses mesmos autores demonstraram que a presença de *Apis mellifera* em sistemas cafeeiros consorciados com flora ruderal e Plantas Alimentícias Não Convencionais (PANCs) pode proporcionar incrementos de até 39,2% na produtividade dos cafezais, evidenciando a relevância dos serviços ecossistêmicos de polinização para a sustentabilidade econômica da atividade (Figura 14).



Figura 14. Relação entre atividade de polinizadores e produtividade em agroecossistemas cafeeiros. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Outro aspecto relevante refere-se à regulação hídrica e à conservação do solo. Conforme destacado por Jose (2009) e Louback *et al.* (2022), a cobertura arbórea permanente dos SAFs contribui para reduzir o escoamento superficial, aumentar a infiltração de água, proteger nascentes e minimizar processos erosivos. A deposição contínua de serapilheira melhora a estrutura física do solo, favorece a retenção de umidade, estimula a atividade biológica e intensifica a ciclagem de nutrientes. Esses processos fortalecem a provisão de serviços ecossistêmicos fundamentais para a sustentabilidade da produção agrícola e para a conservação dos recursos naturais.

A conectividade ecológica também pode ser potencializada pelo uso de geotecnologias. Ferramentas como Sistemas de Informações Geográficas (SIG), sensoriamento remoto e georreferenciamento permitem identificar corredores ecológicos, fragmentos florestais, áreas prioritárias para restauração e zonas

estratégicas para a conservação dos recursos naturais. Segundo Martinelli *et al.* (2020), essas tecnologias são fundamentais para compreender a dinâmica das paisagens agrícolas e subsidiar políticas voltadas à sustentabilidade territorial. De forma complementar, a Embrapa Café (2023) ressalta que a integração entre georreferenciamento, modelagem espacial e monitoramento ambiental possibilita um planejamento mais eficiente dos sistemas produtivos, conciliando produtividade, conservação ambiental e rastreabilidade territorial.

Na região do Caparaó, caracterizada por forte heterogeneidade topográfica e elevada diversidade ambiental, as geotecnologias permitem integrar informações sobre relevo, cobertura vegetal, uso e ocupação do solo, recursos hídricos e biodiversidade. Essa abordagem subsidia o planejamento territorial e a identificação de áreas prioritárias para conservação, restauração e formação de corredores ecológicos, favorecendo a construção de paisagens multifuncionais capazes de conciliar conservação ambiental, produção agrícola e geração de renda. Como consequência, fortalece-se a conectividade da paisagem, amplia-se a provisão de serviços ecossistêmicos e aumenta-se a resiliência dos agroecossistemas frente às mudanças climáticas e às pressões antrópicas (Magalhães *et al.*, 2024; Santos *et al.*, 2024).

Dessa forma, os SAFs assumem papel estratégico não apenas como sistemas produtivos, mas também como instrumentos de restauração ecológica e ordenamento territorial. Ao promover a conectividade da paisagem e ampliar a oferta de serviços ecossistêmicos, esses sistemas contribuem para a sustentabilidade da cafeicultura e criam as bases ecológicas necessárias para iniciativas de valorização territorial, certificação de origem e remuneração por serviços ambientais.

3.6. Denominação de Origem, pagamento por serviços ambientais e valorização territorial

A valorização dos cafés produzidos em SAFs não decorre exclusivamente de seus atributos agronômicos e ambientais. Em regiões produtoras de cafés especiais, a qualidade dos grãos está diretamente associada às características naturais do território, aos saberes locais, às práticas produtivas desenvolvidas

ao longo das gerações e às inovações incorporadas ao sistema produtivo. Nesse contexto, instrumentos como a Denominação de Origem (DO), as geotecnologias, as tecnologias sustentáveis de pós-colheita e os programas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) assumem papel estratégico na promoção do desenvolvimento territorial sustentável (Avellar, 2014; Embrapa Café, 2023; Espírito Santo, 2023; Vardiero *et al.*, 2024).

A região do Caparaó destaca-se nacionalmente pela produção de cafés especiais cultivados em ambientes de montanha, sob condições edafoclimáticas singulares. A combinação entre altitude elevada, amplitude térmica, disponibilidade hídrica, diversidade ambiental e tradição produtiva contribui para a formação de perfis sensoriais diferenciados, amplamente reconhecidos pelos mercados especializados (Calabianqui *et al.*, 2025). Segundo Avellar (2014) e Vardiero *et al.* (2024), a construção da identidade dos cafés do Caparaó está intimamente relacionada à interação entre ambiente, cultura, tradição produtiva e conhecimento técnico acumulado pelos agricultores ao longo de gerações.

Esse conjunto de fatores está associado ao conceito de *terroir*, utilizado para explicar a influência das características naturais e humanas sobre a qualidade dos produtos agrícolas. Na cafeicultura, o *terroir* envolve a interação entre clima, relevo, solo, altitude, biodiversidade e práticas de manejo, resultando em características sensoriais únicas que diferenciam determinados cafés no mercado. O reconhecimento dessa singularidade territorial foi formalizado por meio da Denominação de Origem Caparaó, concedida pelo Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI, 2021), fortalecendo a identidade regional e ampliando as oportunidades de agregação de valor aos produtos locais.

Além de proteger a origem geográfica, a DO contribui para fortalecer a competitividade dos produtores, ampliar a rastreabilidade da produção e estimular práticas agrícolas compatíveis com a conservação ambiental. Nesse processo, as geotecnologias desempenham papel fundamental. Conforme destacam Martinelli *et al.* (2020) e a Embrapa Café (2023), o emprego de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), georreferenciamento por satélite e sensoriamento remoto permite delimitar com precisão as áreas produtoras, caracterizar os ambientes de cultivo e monitorar atributos relacionados ao *terroir*. Essas ferramentas possibilitam identificar variações de altitude, declividade,

orientação das encostas, cobertura vegetal e uso do solo, fornecendo subsídios técnicos para a segregação de lotes, rastreabilidade e certificação de cafés especiais.

A compreensão do *terroir* depende justamente da integração desses múltiplos fatores ambientais e territoriais. Conforme ilustrado na Figura 15, a identidade dos cafés do Caparaó resulta da interação entre altitude, clima, relevo, biodiversidade e sistemas produtivos, elementos que conferem singularidade à bebida e sustentam o reconhecimento da Denominação de Origem (Vardiero *et al.*, 2024).



Figura 15. Elementos constituintes do *terroir* e da identidade dos cafés especiais do Caparaó. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Embora os atributos naturais do território sejam fundamentais para a formação da qualidade dos cafés do Caparaó, a expressão plena desse potencial depende das práticas adotadas durante as etapas de colheita e pós-colheita. Assim, além das condições ambientais que definem o *terroir*, as inovações tecnológicas desenvolvidas pelos agricultores e instituições de pesquisa da região desempenham papel decisivo na preservação e valorização das características sensoriais dos grãos (Vardiero *et al.*, 2024; Fernandes *et al.*, 2025).

A valorização territorial promovida pela Denominação de Origem também está associada às inovações tecnológicas desenvolvidas pelos agricultores e instituições de pesquisa da região. Entre essas inovações, destacam-se os terreiros suspensos construídos com bambu, tecnologia de baixo custo difundida entre produtores familiares do Caparaó. De acordo com a Embrapa Café (2023), tecnologias apropriadas de pós-colheita contribuem para maior controle da secagem, redução de perdas e melhoria da qualidade final do produto. No caso dos terreiros suspensos, a elevação dos frutos em relação ao solo favorece maior circulação de ar, uniformidade de secagem e redução dos riscos de contaminação por fungos produtores de micotoxinas, como *Aspergillus ochraceus*, associado à produção de Ocratoxina A.

A viabilidade dessa tecnologia está diretamente relacionada à ampla disponibilidade de espécies de bambu e ao baixo custo de obtenção dos materiais utilizados em sua construção. Além de apresentar elevada resistência mecânica e rápida renovação, o bambu constitui um recurso renovável amplamente adaptado às condições ambientais da região, tornando-se uma alternativa compatível com os princípios da sustentabilidade econômica e ambiental da agricultura familiar (Figura 16).



Figura 16. Espécies de bambu utilizadas na construção de terreiros suspensos e sua contribuição para a redução dos custos de pós-colheita. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A diversidade de espécies de bambu ilustrada na Figura 16 amplia as possibilidades de adaptação da tecnologia às condições locais de cada propriedade, reduzindo a dependência de materiais industrializados e fortalecendo estratégias produtivas alinhadas aos princípios da economia circular e da sustentabilidade rural.

A adoção dessa tecnologia ilustra como a inovação pode ser construída a partir da combinação entre conhecimento científico, saberes locais e uso de materiais disponíveis na própria região. Ao utilizar diferentes espécies de bambu e estruturas de baixo custo, os produtores conseguem reduzir o investimento inicial e, simultaneamente, elevar a qualidade final dos cafés. Dessa forma, a agregação de valor aos cafés do Caparaó passa a resultar não apenas dos atributos naturais do *terroir*, mas também da incorporação de práticas sustentáveis de pós-colheita capazes de fortalecer a identidade regional e ampliar a competitividade dos produtores familiares nos mercados especializados (Avellar, 2014; Embrapa Café, 2023).

A disponibilidade de diferentes espécies de bambu permite adaptar a tecnologia às condições específicas de cada propriedade, tornando os terreiros suspensos uma solução acessível para pequenos e médios produtores. A aplicação prática dessa inovação pode ser observada na Figura 17, que ilustra um modelo de terreiro suspenso amplamente utilizado por cafeicultores do Caparaó.

Além da valorização comercial proporcionada pela Denominação de Origem e pelas tecnologias de pós-colheita, a adoção de práticas agroflorestais gera benefícios ambientais que podem ser reconhecidos por mecanismos de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA). Esses instrumentos econômicos buscam remunerar produtores rurais pelas contribuições proporcionadas à sociedade por meio da conservação da vegetação nativa, da proteção dos recursos hídricos, do sequestro de carbono, da manutenção da biodiversidade e da conectividade da paisagem (Jose, 2009; Gliessman, 2021; Neves *et al.*, 2026).

No Espírito Santo, destaca-se o Programa Reflorestar, considerado uma das principais políticas públicas de incentivo à restauração ambiental e à produção sustentável no meio rural. Segundo a Secretaria de Estado da

Agricultura, Abastecimento, Aquicultura e Pesca (Espírito Santo, 2023), o programa tem contribuído para ampliar a cobertura florestal, recuperar áreas degradadas, proteger nascentes e estimular a adoção de sistemas produtivos sustentáveis, incluindo os SAFs, em propriedades rurais capixabas.



Figura 17. Terreiro suspenso de bambu utilizado na secagem de cafés especiais: inovação tecnológica desenvolvida e aperfeiçoada por cafeicultores do Caparaó. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A convergência entre SAFs, Denominação de Origem, geotecnologias, tecnologias sustentáveis de pós-colheita e PSA cria um ambiente favorável à construção de modelos agrícolas mais resilientes e competitivos. Ao mesmo tempo em que promove geração de renda, agregação de valor e fortalecimento da identidade territorial, essa integração contribui para a conservação dos recursos naturais e para o desenvolvimento sustentável das comunidades rurais (Avellar, 2014; Martinelli *et al.*, 2020; Espírito Santo, 2023; Neves *et al.*, 2026).

Nesse contexto, experiências como a do Sítio Relíquia do Caparaó demonstram, na prática, como a articulação entre produção agroflorestal, conservação ambiental, inovação tecnológica, Programa Reflorestar e Denominação de Origem pode constituir um caminho promissor para a construção de uma cafeicultura capaz de conciliar qualidade, sustentabilidade, valorização territorial e reconhecimento internacional.

Assim, a experiência do Caparaó evidencia que biodiversidade funcional, geotecnologias, certificação de origem, PSA e tecnologias sustentáveis de pós-colheita constituem componentes complementares de uma mesma estratégia de desenvolvimento territorial. A efetividade dessa estratégia, entretanto, depende diretamente da adequada seleção das espécies e do manejo adotado ao longo do ciclo produtivo, aspectos fundamentais para garantir o equilíbrio ecológico e a viabilidade econômica dos SAFs.

Seção 4

Escolha das espécies e manejo

A escolha das espécies e o manejo adotado constituem dois dos principais fatores responsáveis pelo sucesso dos Sistemas Agroflorestais (SAFs) aplicados à cafeicultura. Diferentemente dos sistemas convencionais, nos quais a seleção das culturas geralmente considera apenas aspectos produtivos ou econômicos, os SAFs são estruturados a partir da complementaridade ecológica entre os diferentes componentes vegetais. Dessa forma, cada espécie introduzida no sistema desempenha funções específicas relacionadas à ciclagem de nutrientes, ao sombreamento, à proteção do solo, à oferta de recursos para a biodiversidade, à diversificação da produção e à estabilidade econômica da propriedade (Gliessman, 2015; Miccolis *et al.*, 2016; Neves *et al.*, 2026).

Sob essa perspectiva, para esses mesmos autores, a implantação de um SAF não corresponde simplesmente ao plantio simultâneo de árvores e cafeeiros, mas ao planejamento de um agroecossistema multifuncional, no qual as espécies ocupam diferentes nichos ecológicos e interagem de forma complementar ao longo do tempo. Essa organização depende do conhecimento das características ecofisiológicas de cada espécie, de sua posição na estratificação vertical, da velocidade de crescimento, do comportamento radicular, da capacidade de produzir biomassa, da interação com a fauna benéfica e da resposta às práticas de manejo, especialmente às podas periódicas.

Além dos aspectos ecológicos, a seleção das espécies deve considerar os objetivos da propriedade rural. Sistemas voltados prioritariamente para a produção de cafés especiais podem privilegiar espécies que promovam sombreamento moderado e melhoria do microclima, enquanto propriedades que buscam ampliar a diversificação econômica tendem a incorporar árvores frutíferas, madeireiras, palmeiras e espécies de elevado valor comercial. Em ambos os casos, o planejamento deve buscar o equilíbrio entre produtividade, conservação ambiental e viabilidade econômica, assegurando que os benefícios ecológicos proporcionados pelas árvores também se convertam em maior

estabilidade produtiva e geração de renda para o agricultor (Montagnini; Nair, 2004; Gliessman, 2015).

Outro aspecto indispensável refere-se à adaptação das espécies às condições edafoclimáticas locais. Fatores como altitude, regime pluviométrico, disponibilidade hídrica, fertilidade do solo, declividade do terreno e risco de geadas ou de déficit hídrico influenciam diretamente o desempenho das espécies arbóreas e sua interação com o cafeeiro. Assim, a composição florística de um SAF deve ser planejada de forma específica para cada região, respeitando as características ambientais e valorizando, sempre que possível, espécies nativas capazes de fortalecer a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos do agroecossistema (Altieri, 2012; van Noordwijk *et al.*, 2021).

4.1. Critérios para seleção das espécies

A definição das espécies que compõem um SAF deve resultar da integração entre critérios ecológicos, agrônômicos, econômicos e sociais. Mais do que selecionar árvores de interesse comercial, o planejamento busca construir um sistema biologicamente estável, no qual cada componente vegetal exerça funções complementares ao desenvolvimento do cafeeiro e à manutenção dos processos ecológicos essenciais (Gliessman, 2015; van Noordwijk *et al.*, 2019).

Entre os principais critérios utilizados destacam-se a adaptação climática das espécies, a compatibilidade com as condições edáficas, a velocidade de crescimento, o porte final, o comportamento do sistema radicular, a capacidade de produção de biomassa, o potencial de fixação biológica de nitrogênio, a tolerância às podas, a produção de alimentos ou madeira e a contribuição para a biodiversidade funcional. Também devem ser considerados aspectos relacionados ao calendário de produção, à demanda de mão de obra e às oportunidades de comercialização dos diferentes produtos gerados pelo sistema (Nair, 1993; Montagnini; Nair, 2004).

Nos SAFs cafeeiros, o cafeeiro ocupa geralmente o estrato intermediário ou de sub-bosque, desempenhando o papel de cultura principal do sistema. A inserção de espécies de crescimento rápido, como bananeira (*Musa* spp.) e

mamoeiro (*Carica papaya*), contribui para o sombreamento inicial, proteção do solo e geração de renda nos primeiros anos de implantação. Essa ocupação planejada do ecossistema distribui as culturas em diferentes andares produtivos, formando uma arquitetura multiestratificada na qual cada componente desempenha funções ecológicas e econômicas complementares (Gliessman, 2015; Miccolis *et al.*, 2016) (Figura 18).

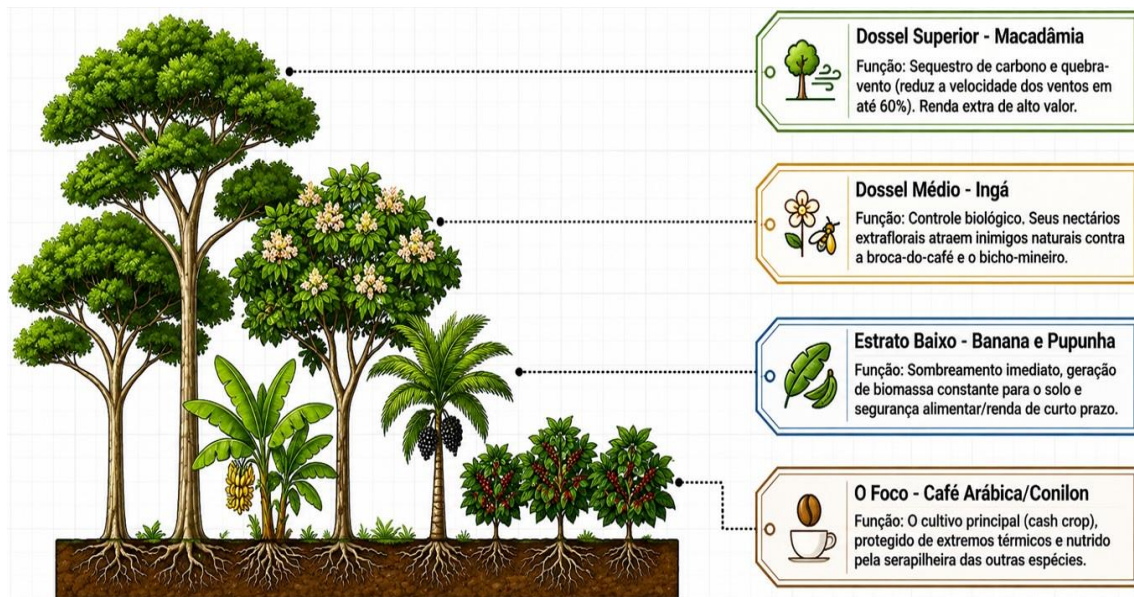


Figura 18. Distribuição dos estratos vegetais e funções ecológicas em Sistema Agroflorestal cafeeiro multiestratificado. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A organização vertical ilustrada na Figura 18 evidencia que a eficiência dos SAFs não decorre apenas da diversidade de espécies, mas principalmente da complementaridade funcional entre os diferentes estratos vegetais. Ao explorar distintos níveis de luminosidade, profundidades do solo e nichos ecológicos, as espécies reduzem a competição direta por recursos e potencializam processos como ciclagem de nutrientes, proteção do solo, regulação microclimática e conservação da biodiversidade. Dessa forma, a escolha criteriosa das espécies arbóreas torna-se um dos principais fatores responsáveis pelo desempenho agrônomo, ecológico e econômico dos SAFs cafeeiros, justificando a análise das espécies mais utilizadas nesses sistemas.

4.2. Espécies arbóreas utilizadas nos SAFs cafeeiros

A composição florística dos SAFs cafeeiros deve ser planejada de forma a integrar espécies com diferentes funções ecológicas, produtivas e econômicas. Diferentemente dos monocultivos, nos quais todas as plantas desempenham praticamente a mesma função produtiva, os SAFs são estruturados segundo o princípio da complementaridade funcional, em que cada espécie contribui para a estabilidade do agroecossistema por meio da ocupação de nichos ecológicos distintos. Essa diversidade funcional amplia a eficiência do uso da luz, da água e dos nutrientes, fortalece a biodiversidade e reduz a vulnerabilidade do sistema frente às oscilações climáticas e fitossanitárias (Gliessman, 2015; Miccolis *et al.*, 2016).

A otimização do espaço aéreo e subterrâneo ocorre por intermédio do manejo integrado dos diferentes estratos vegetais. Enquanto o dossel superior é ocupado por espécies arbóreas de maior porte e ciclo longo, responsáveis pelo sombreamento moderado, pela proteção contra ventos, pelo sequestro de carbono e pela produção de madeira ou frutos de elevado valor comercial, os estratos intermediários concentram espécies que regulam o microclima, promovem intensa produção de biomassa e favorecem a ciclagem de nutrientes. O cafeeiro, por sua vez, ocupa geralmente o estrato de sub-bosque, beneficiando-se das condições ambientais criadas pelos componentes arbóreos superiores (Gliessman, 2015; Miccolis *et al.*, 2016).

Entre as espécies de maior importância ecológica destacam-se as leguminosas arbóreas, como o ingá (*Inga spp.*) e a gliricídia (*Gliricidia sepium*). Essas espécies exercem papel estratégico na fixação biológica de nitrogênio (FBN), na produção de grande quantidade de biomassa foliar e na formação de cobertura morta, contribuindo para o aumento dos teores de matéria orgânica, melhoria da estrutura física do solo e intensificação da ciclagem de nutrientes. Sob manejo periódico de podas, essas árvores regulam dinamicamente o sombreamento do cafeeiro, favorecendo o equilíbrio entre disponibilidade de luz e conservação da umidade, além de reduzir significativamente a necessidade de fertilizantes nitrogenados sintéticos (Nair, 1993; Montagnini; Nair, 2004; Santos *et al.*, 2021).

Nos primeiros anos de implantação dos SAFs, espécies de crescimento rápido e retorno econômico precoce desempenham papel fundamental na viabilidade do sistema. A bananeira (*Musa* spp.), por exemplo, proporciona sombreamento temporário, reduz a ação direta das chuvas sobre o solo, aumenta a umidade do ambiente e gera renda ainda durante a fase de formação do cafezal. De maneira semelhante, a pupunheira (*Bactris gasipaes*) pode ser incorporada ao sistema para produção de palmito, enquanto o mamoeiro (*Carica papaya*) e o abacateiro (*Persea americana*) ampliam a diversificação da produção, fortalecendo a segurança alimentar das famílias agricultoras e reduzindo a dependência econômica da comercialização exclusiva do café (Gliessman, 2015; FAO, 2022).

Espécies arbóreas destinadas à produção de madeira também desempenham funções relevantes na arquitetura dos SAFs. Árvores como cedro (*Cedrela fissilis*), jequitibá (*Cariniana legalis*), ipês (*Handroanthus* spp.) e mogno (*Swietenia macrophylla*) podem ser incorporadas ao sistema visando à obtenção de madeira de elevado valor agregado em longo prazo. Além da função econômica, essas espécies contribuem para o aumento da complexidade estrutural do agroecossistema, favorecem a formação de corredores ecológicos, ampliam o estoque de carbono e atuam como importantes reguladores microclimáticos, reduzindo a velocidade dos ventos e atenuando as variações térmicas sobre a lavoura (Montagnini; Nair, 2004; van Noordwijk *et al.*, 2019; Souza *et al.*, 2024).

Em sistemas voltados à produção de cafés especiais, espécies como a noqueira-macadâmia (*Macadamia integrifolia*) assumem importância crescente por aliarem benefícios ecológicos e elevada rentabilidade econômica. O estrato superior formado por essas árvores proporciona sombreamento moderado e de boa qualidade, sem comprometer a disponibilidade luminosa necessária ao cafeeiro. Paralelamente, a produção de nozes representa uma importante fonte complementar de renda, aumentando a estabilidade financeira da propriedade e distribuindo o fluxo de receitas ao longo do ano (Nair, 1993; Gliessman, 2015).

Mais do que selecionar espécies isoladamente, o sucesso dos Sistemas Agroflorestais depende da combinação harmoniosa entre seus diferentes componentes. A integração entre árvores fixadoras de nitrogênio, espécies

produtoras de biomassa, frutíferas, madeiras e palmeiras permite construir agroecossistemas multifuncionais, capazes de conciliar elevada produtividade, conservação ambiental, diversificação econômica e provisão de serviços ecossistêmicos. Essa complementaridade funcional transforma os SAFs em sistemas altamente resilientes, nos quais a biodiversidade deixa de representar apenas um atributo ecológico e passa a constituir um dos principais fatores responsáveis pela estabilidade produtiva e pela sustentabilidade da cafeicultura contemporânea (Altieri, 2012; Gliessman, 2015; van Noordwijk *et al.*, 2019).

4.3. Arranjos espaciais e densidade de plantio

A seleção criteriosa das espécies representa apenas a primeira etapa do planejamento de um SAF. A eficiência ecológica e produtiva desses sistemas depende igualmente da forma como seus componentes são distribuídos no espaço e conduzidos ao longo do tempo. Assim, o arranjo espacial constitui um elemento central do planejamento agroflorestal, pois determina a intensidade das interações entre as espécies, a disponibilidade de luz, água e nutrientes, a circulação de ar no interior do sistema e o equilíbrio entre cooperação e competição vegetal (Gliessman, 2015; Miccolis *et al.*, 2016).

Nos SAFs cafeeiros, a organização espacial deve buscar maximizar a complementaridade funcional entre os diferentes componentes vegetais. O princípio básico consiste em distribuir as espécies de modo que ocupem nichos ecológicos distintos, reduzindo a competição direta pelos mesmos recursos ambientais. Dessa forma, árvores de grande porte exploram camadas mais profundas do solo e interceptam a radiação solar nos estratos superiores, enquanto o cafeeiro permanece protegido no sub-bosque, recebendo níveis moderados de luminosidade que favorecem seu desenvolvimento fisiológico e a qualidade dos frutos (Nair, 1993; Miccolis *et al.*, 2016).

A definição do espaçamento entre cafeeiros e árvores depende de diversos fatores, como a cultivar utilizada, a fertilidade do solo, a disponibilidade hídrica, a altitude, a declividade do terreno e os objetivos produtivos da propriedade. Em áreas destinadas à produção de cafés especiais, o manejo do sombreamento tende a ser mais criterioso, buscando proporcionar níveis intermediários de

interceptação da radiação solar capazes de reduzir o estresse térmico sem comprometer a atividade fotossintética do cafeeiro. Assim, não existe um arranjo universalmente recomendado, sendo necessário adaptar o desenho do sistema às condições ambientais e socioeconômicas de cada propriedade (Beer *et al.*, 1998; Gliessman, 2015).

Entre os arranjos mais utilizados destacam-se as linhas simples de árvores intercaladas com faixas de cafeeiros, as linhas duplas destinadas ao aumento da produção de biomassa e da proteção contra ventos, os renques arborizados implantados em curvas de nível e os sistemas multiestratificados, nos quais diferentes espécies ocupam simultaneamente distintos andares da vegetação. Em terrenos montanhosos, característicos da região do Caparaó, a implantação das linhas acompanhando as curvas de nível reduz o escoamento superficial, favorece a infiltração de água, minimiza processos erosivos e contribui para maior estabilidade física do solo (Nair, 1993; Miccolis *et al.*, 2016; Neves *et al.*, 2026).

Outro aspecto de grande relevância refere-se à orientação das linhas de plantio em relação ao deslocamento aparente do Sol e aos ventos predominantes. A disposição adequada das árvores permite distribuir o sombreamento de forma mais uniforme ao longo do dia, evitando áreas excessivamente sombreadas ou expostas à radiação solar intensa. Além disso, o posicionamento estratégico das espécies arbóreas pode atuar como quebra-vento natural, reduzindo danos mecânicos às plantas, diminuindo a evapotranspiração e contribuindo para a formação de um microclima mais estável no interior do agroecossistema (Beer *et al.*, 1998; Gliessman, 2015; Neves *et al.*, 2026).

Nos SAFs modernos, a distribuição espacial das espécies também considera a arquitetura radicular e o comportamento fisiológico de cada componente. Espécies com sistemas radiculares profundos exploram horizontes inferiores do solo, reciclando nutrientes que posteriormente retornam à superfície por meio da deposição de folhas, galhos e frutos. Paralelamente, espécies de raízes superficiais atuam na estabilização da camada mais fértil do solo e na rápida incorporação da matéria orgânica. Essa complementaridade reduz a

competição por água e nutrientes e aumenta significativamente a eficiência ecológica do sistema (Nair, 1993; Montagnini; Nair, 2004).

Além da organização horizontal, os SAFs distinguem-se pela elevada complexidade de sua estrutura vertical. A ocupação simultânea dos estratos emergente, superior, intermediário, arbustivo e herbáceo permite ampliar o aproveitamento da radiação solar e criar uma arquitetura semelhante à observada em ecossistemas florestais naturais. Essa estratificação favorece a coexistência entre espécies com diferentes exigências ecológicas, amplia a biodiversidade funcional e fortalece os processos naturais de ciclagem de nutrientes, regulação microclimática, conservação da umidade e sequestro de carbono (Gliessman, 2015; van Noordwijk *et al.*, 2019).

A organização espacial dos componentes vegetais representa uma das principais diferenças entre os Sistemas Agroflorestais e os sistemas convencionais de cultivo. O planejamento integrado da disposição das espécies, da ocupação dos estratos, da orientação das linhas de plantio e da complementaridade entre os sistemas radiculares permite otimizar o aproveitamento dos recursos ambientais e fortalecer as interações ecológicas responsáveis pela estabilidade do agroecossistema. Mais do que uma intervenção técnica, a poda periódica funciona como um regulador dinâmico do sistema, ditando o ritmo de acúmulo de biomassa, a renovação vigorosa dos estratos vegetais e a redistribuição de energia e nutrientes no agroecossistema (Nair, 1993; Götsch, 1995; Gliessman, 2015; Miccolis *et al.*, 2016). Esses princípios são sintetizados na Figura 19.

Conforme ilustrado na Figura 19, o desempenho dos SAFs não depende apenas da escolha das espécies, mas principalmente da forma como elas são distribuídas no espaço e manejadas ao longo do tempo. A combinação entre diferentes estratos vegetais, arquiteturas radiculares complementares, orientação adequada das linhas de plantio e uso estratégico de renques arbóreos reduz a competição entre os componentes do sistema e potencializa processos como a ciclagem de nutrientes, a conservação da água, a regulação microclimática e a provisão de serviços ecossistêmicos. Dessa forma, o arranjo espacial constitui um dos principais instrumentos de engenharia ecológica

aplicados à cafeicultura agroflorestal (Nair, 1993; Gliessman, 2015; Miccolis *et al.*, 2016).

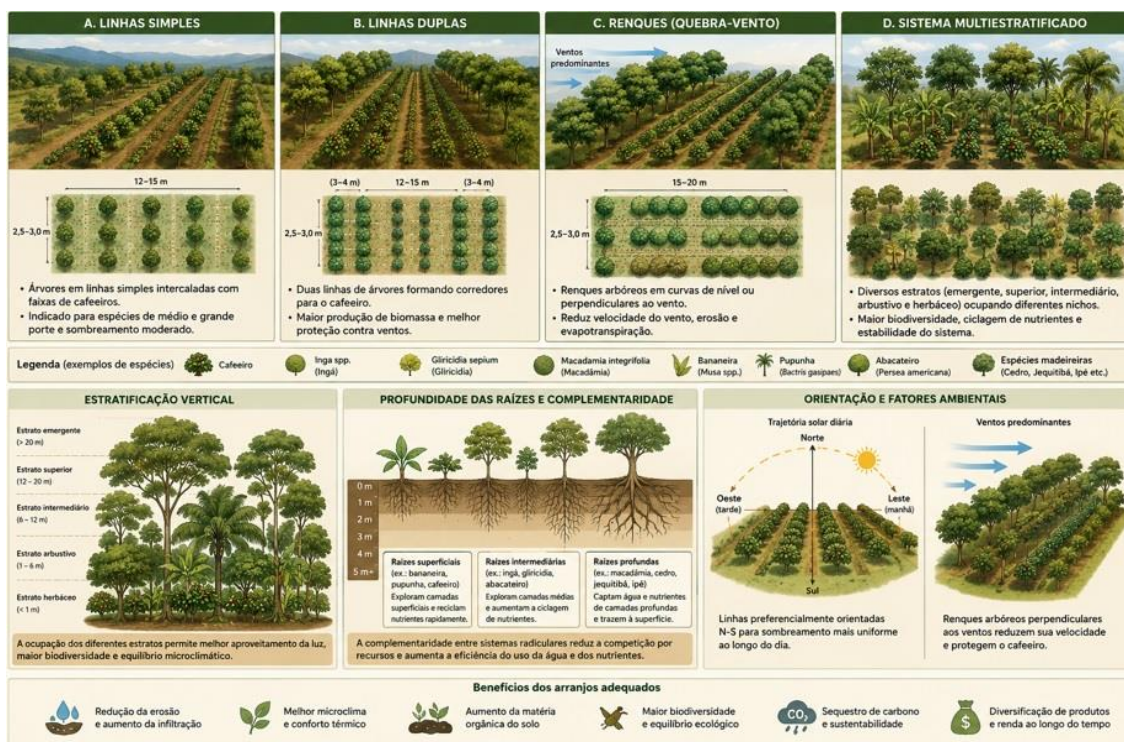


Figura 19. Arranjos espaciais e estratificação em Sistemas Agroflorestais cafeeiros. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (ChatGPT).

Sob essa perspectiva, o arranjo espacial deixa de representar apenas uma decisão relacionada ao espaçamento entre plantas e passa a constituir uma estratégia de engenharia ecológica voltada à organização funcional do agroecossistema. O planejamento integrado da arquitetura do sistema transforma potenciais relações de competição em interações cooperativas, promovendo maior eficiência no uso dos recursos naturais, estabilidade ecológica, produtividade e resiliência dos Sistemas Agroflorestais cafeeiros frente às mudanças climáticas e às oscilações ambientais (Altieri, 2012; Gliessman, 2015; van Noordwijk *et al.*, 2019).

4.4. Manejo da poda e condução das árvores

A implantação de um SAF representa apenas o início do processo de construção do agroecossistema. A manutenção do equilíbrio ecológico e da

produtividade ao longo do tempo depende diretamente do manejo contínuo da vegetação, especialmente das práticas de poda e condução das espécies arbóreas. Diferentemente da agricultura convencional, em que a poda frequentemente possui finalidade apenas fitotécnica, nos SAFs essa prática assume uma função ecológica central, regulando o fluxo de energia, a ciclagem de nutrientes, a disponibilidade de luz e a dinâmica sucessional do sistema (Gliessman, 2015; Miccolis *et al.*, 2016).

Entre as práticas mais importantes destacam-se a poda das espécies arbóreas para regular o sombreamento e a disponibilidade de luz, o manejo da cobertura morta para conservação da umidade e proteção do solo, bem como o acompanhamento contínuo da sucessão vegetal. Essas intervenções permitem ajustar continuamente a arquitetura do sistema às exigências fisiológicas do cafeeiro e às mudanças naturais decorrentes do crescimento das árvores (Nair, 1993; Beer *et al.*, 1998; Miccolis *et al.*, 2016).

Mais do que uma simples intervenção técnica, a poda periódica funciona como um regulador dinâmico do agroecossistema. Ao reduzir temporariamente o sombreamento, favorece a entrada de radiação solar necessária ao desenvolvimento vegetativo e reprodutivo do cafeeiro. Simultaneamente, o material proveniente das podas permanece sobre o solo formando uma espessa camada de cobertura orgânica, que reduz a evaporação da água, protege contra o impacto direto das chuvas, diminui os processos erosivos e fornece matéria-prima para intensa atividade da fauna e da microbiota edáfica (Gliessman, 2015; Miccolis *et al.*, 2016; Martins *et al.*, 2022).

Em espécies leguminosas arbóreas, como o ingá (*Inga* spp.) e a gliricídia (*Gliricidia sepium*), esses benefícios são potencializados pela elevada produção de biomassa e pela capacidade de estabelecer simbiose com bactérias fixadoras de nitrogênio atmosférico. A fixação biológica de nitrogênio, associada à deposição contínua de resíduos orgânicos, contribui para o aumento dos teores de matéria orgânica, melhora a estrutura física do solo, estimula a atividade da microbiota edáfica e amplia a disponibilidade de nutrientes para o cafeeiro. Como resultado, o manejo periódico dessas espécies fortalece os processos ecológicos que sustentam a produtividade do sistema, reduzindo a necessidade

de fertilizantes minerais e aumentando a autonomia dos Sistemas Agroflorestais cafeeiros (Miccolis *et al.*, 2016; Martins *et al.*, 2022).

Sob a perspectiva da Agricultura Sintrópica, a poda constitui um dos principais mecanismos de manejo da sucessão ecológica. A remoção periódica da biomassa estimula o rebrote das espécies arbóreas, intensifica a produção de matéria orgânica, regula a disponibilidade de luz e acelera a renovação funcional dos diferentes estratos vegetais. Como consequência, ampliam-se a ciclagem de nutrientes, a atividade biológica do solo e a complexidade estrutural do agroecossistema, favorecendo sua evolução sucessional. Nessa abordagem, o manejo não busca controlar a vegetação, mas direcionar os processos naturais de regeneração e cooperação ecológica, tornando o sistema agrícola progressivamente mais complexo, resiliente e eficiente no uso da energia e dos recursos naturais (Götsch, 1995; Gliessman, 2015; Miccolis *et al.*, 2016).

A importância ecológica desse manejo pode ser compreendida por meio da dinâmica representada na Figura 20, na qual a poda é apresentada como o elemento articulador do fluxo contínuo de energia, matéria e nutrientes entre os diferentes componentes do SAF.

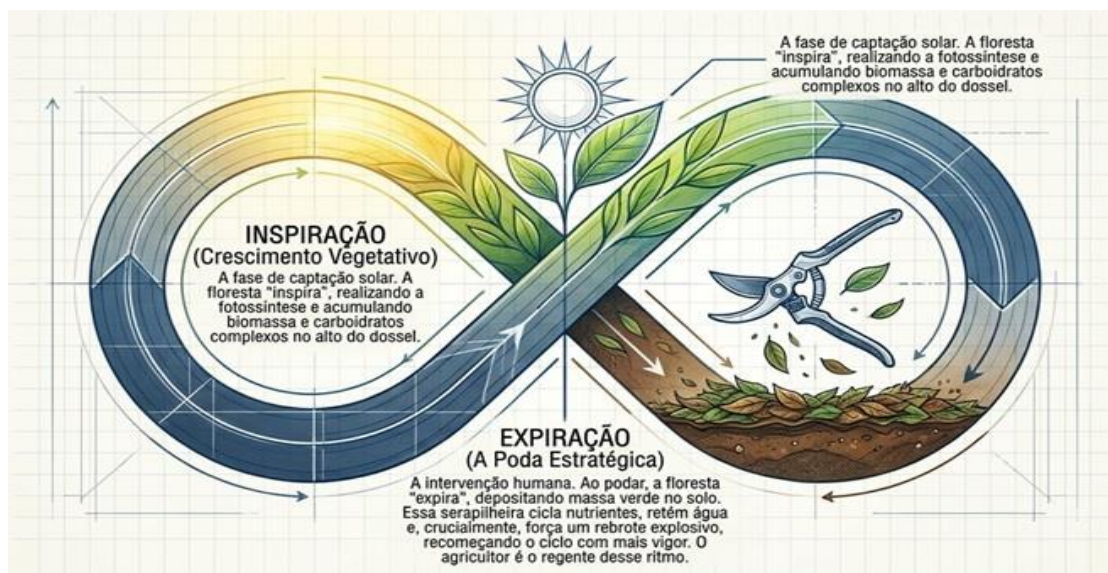


Figura 20. O “pulso” da floresta: a poda como eixo da ciclagem de nutrientes e da renovação ecológica em Sistemas Agroflorestais cafeeiros. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A representação cíclica da Figura 20 sintetiza a dinâmica ecológica que caracteriza os Sistemas Agroflorestais manejados. O ciclo inicia-se com a fase de crescimento vegetativo, durante a qual as árvores capturam energia solar, absorvem água e nutrientes em diferentes profundidades do perfil do solo e os convertem em biomassa. O elemento central desse processo é a poda planejada, que atua como um regulador ecológico ao promover a abertura temporária do dossel, ampliar a disponibilidade de luz para o cafeeiro e redistribuir grande quantidade de biomassa sobre a superfície do solo. A decomposição desse material alimenta a fauna e a microbiota edáfica, intensifica a ciclagem de nutrientes, favorece o rebrote vigoroso das espécies arbóreas e impulsiona um novo ciclo de crescimento. Dessa forma, a poda deixa de representar apenas uma prática de manejo e passa a constituir o principal mecanismo de renovação funcional do agroecossistema, integrando o fluxo de energia, a sucessão ecológica e a manutenção da fertilidade do solo (Gliessman, 2015; Miccolis *et al.*, 2016).

Assim, a poda deixa de representar apenas uma técnica de condução das árvores para assumir o papel de principal mecanismo regulador dos Sistemas Agroflorestais. Ao sincronizar crescimento vegetal, disponibilidade de luz, produção de biomassa, atividade biológica do solo e reciclagem de nutrientes, essa prática fortalece a resiliência ecológica do agroecossistema e contribui para a estabilidade produtiva do cafeeiro ao longo do tempo.

A escolha criteriosa das espécies, associada ao planejamento espacial e ao manejo contínuo do componente arbóreo, constitui um dos pilares para o sucesso dos Sistemas Agroflorestais cafeeiros. A integração entre estratificação da vegetação, complementaridade funcional, manejo da biomassa e condução da sucessão ecológica transforma o cafezal em um agroecossistema altamente resiliente, biodiverso e eficiente no aproveitamento dos recursos naturais. Nessa abordagem, árvores, cafeeiros e demais componentes vegetais deixam de competir pelos mesmos recursos e passam a desempenhar funções ecológicas complementares, fortalecendo processos como a ciclagem de nutrientes, a conservação do solo e da água, a regulação microclimática, o sequestro de carbono e a manutenção da biodiversidade funcional (Altieri, 2012; Gliessman, 2015; Miccolis *et al.*, 2016).

Mais do que uma alternativa conservacionista, os SAFs consolidam-se como uma estratégia de engenharia ecológica aplicada à produção agrícola, capaz de integrar produtividade, conservação ambiental e viabilidade econômica em um mesmo sistema produtivo. Essa convergência demonstra que sustentabilidade ambiental e desempenho econômico não constituem objetivos antagônicos, mas dimensões complementares de um modelo de desenvolvimento agrícola fundamentado nos processos ecológicos e na valorização da biodiversidade. Entretanto, embora os benefícios ambientais, produtivos e socioeconômicos dos SAFs estejam amplamente documentados, sua adoção em larga escala ainda enfrenta importantes limitações relacionadas ao planejamento, à assistência técnica, aos custos de implantação e às condições de mercado. A compreensão desses desafios torna-se fundamental para ampliar a difusão da cafeicultura agroflorestal, tema abordado na seção seguinte (Nair, 1993; Miccolis *et al.*, 2016; van Noordwijk *et al.*, 2019).

Desafios na implantação

Apesar dos reconhecidos benefícios ambientais, sociais e econômicos proporcionados pelos Sistemas Agroflorestais (SAFs), sua adoção em larga escala ainda enfrenta importantes desafios técnicos, econômicos, institucionais e culturais. Esses fatores podem limitar a expansão desse modelo produtivo, especialmente entre agricultores familiares, que frequentemente apresentam menor acesso ao crédito, à assistência técnica especializada e às tecnologias necessárias para o planejamento e manejo desses sistemas. Embora os SAFs constituam uma estratégia promissora para a transição agroecológica, sua implantação exige investimentos iniciais, planejamento criterioso e acompanhamento técnico contínuo, condições que nem sempre estão disponíveis nas propriedades rurais (Altieri, 2012; Miccolis *et al.*, 2016; Malaquias *et al.*, 2024).

Entre os principais entraves, destaca-se a insuficiência de serviços de Assistência Técnica e Extensão Rural (ATER) capacitados em agroecologia e manejo agroflorestal. Apesar da ampliação do acesso à informação nas últimas décadas, muitos produtores ainda encontram dificuldades para obter orientações específicas sobre seleção de espécies, planejamento espacial, sucessão ecológica, manejo do sombreamento, condução das podas e monitoramento da dinâmica ecológica dos SAFs. Em muitos casos, os modelos convencionais de assistência técnica permanecem fortemente orientados pelo paradigma da agricultura de alta dependência de insumos externos, priorizando recomendações voltadas ao monocultivo e oferecendo suporte limitado para sistemas produtivos de maior complexidade ecológica (Caporal; Costabeber, 2004; Gliessman, 2015; Malaquias *et al.*, 2024).

A natureza multifuncional dos SAFs demanda conhecimentos que extrapolam as práticas agronômicas convencionais, exigindo uma abordagem integrada que considere simultaneamente aspectos ecológicos, produtivos, econômicos e sociais. Dessa forma, o fortalecimento dos serviços públicos e privados de ATER, aliado à capacitação continuada de técnicos e agricultores,

constitui uma condição essencial para ampliar a adoção dos SAFs e consolidar a transição para sistemas cafeeiros mais resilientes, biodiversos e sustentáveis (Miccolis *et al.*, 2016; FAO, 2022).

Outro desafio importante está relacionado à comercialização da produção e à inserção em mercados diferenciados. Produtos oriundos de SAFs geralmente apresentam maior valor agregado; porém, dependem de nichos específicos de mercado e de mecanismos de certificação para ampliar sua competitividade. Nesse contexto, certificações como produção orgânica, *Fair Trade* (Comércio Justo) e selos de sustentabilidade tornam-se ferramentas relevantes para valorizar os produtos e ampliar o acesso a mercados consumidores mais exigentes, embora os custos e a burocracia para a obtenção de tais chancelas ainda onerem o produtor desorganizado em cooperativas (Chetro *et al.*, 2024).

Além das limitações técnicas, os SAFs também enfrentam desafios de natureza econômica que podem dificultar sua adoção, especialmente durante os primeiros anos de implantação. Em comparação aos sistemas convencionais de monocultivo, os SAFs geralmente demandam investimentos iniciais mais elevados, decorrentes da aquisição de mudas de diferentes espécies, do planejamento detalhado do arranjo agroflorestal, da preparação da área e da maior necessidade de mão de obra para implantação e manejo inicial (Montagnini; Nair, 2004; Miccolis *et al.*, 2016; Marques *et al.*, 2026; Mendonça *et al.*, 2026).

Soma-se a esse cenário o fato de que o retorno econômico desses sistemas ocorre, em muitos casos, de forma gradual, acompanhando o desenvolvimento das espécies arbóreas e a diversificação da produção. Quando o sistema incorpora espécies madeireiras de crescimento lento, a rentabilidade tende a concentrar-se no médio e longo prazo, tornando indispensável o planejamento do fluxo de caixa por meio da inclusão de culturas de ciclo curto e de retorno econômico mais rápido, capazes de gerar renda durante a fase de consolidação do sistema (*ibidem*).

Além das limitações financeiras, fatores socioculturais e institucionais também influenciam a velocidade de adoção dos SAFs. Muitos agricultores ainda demonstram insegurança diante da substituição de sistemas convencionais por modelos mais diversificados, em razão das incertezas econômicas, da

resistência à mudança de práticas consolidadas ao longo de décadas e da limitada disponibilidade de políticas públicas permanentes de incentivo à transição agroecológica. A insuficiência de linhas de crédito específicas, mecanismos de pagamento por serviços ambientais, assistência técnica especializada e instrumentos de comercialização voltados à produção agroflorestal constitui um importante entrave para a expansão desses sistemas em diferentes regiões produtoras (Caporal; Costabeber, 2004; FAO, 2022; Malaquias *et al.*, 2024).

Por outro lado, a necessidade de adequação ambiental das propriedades rurais tem impulsionado a adoção dos Sistemas Agroflorestais como estratégia capaz de conciliar restauração ecológica e produção agrícola. A utilização de SAFs na recomposição de Áreas de Preservação Permanente (APPs) e de Reservas Legais (RL), especialmente nas pequenas propriedades e posses rurais familiares, encontra respaldo no Código Florestal Brasileiro, que prevê mecanismos de uso sustentável dessas áreas em situações específicas. Essa possibilidade permite integrar o cumprimento da legislação ambiental com a geração de renda, a diversificação produtiva e a ampliação dos serviços ecossistêmicos, fortalecendo simultaneamente a conservação da biodiversidade e a sustentabilidade econômica das propriedades rurais (Miccolis *et al.*, 2016; Egidio; Souza, 2025).

Ao consorciar espécies nativas regionais com o cafeeiro e outras culturas de sub-bosque, o produtor transforma o que antes era visto como um passivo ambiental e uma perda de área útil em um espaço produtivo biodiverso (Martins *et al.*, 2022). Essa estratégia mitiga o impacto do custo de oportunidade da terra, facilitando a transição agroecológica ao converter obrigações regulatórias em vetores de segurança econômica e resiliência ecológica na propriedade.

A integração entre restauração ambiental e produção agrícola constitui uma das principais inovações proporcionadas pelos Sistemas Agroflorestais. Ao incorporar espécies arbóreas nativas associadas ao cafeeiro e a outras culturas compatíveis, os SAFs permitem compatibilizar a conservação dos ecossistemas com a geração de renda, especialmente em áreas destinadas à recomposição ambiental. Essa abordagem supera a visão tradicional de que APPs e Reservas Legais representam exclusivamente áreas de restrição ao uso da terra,

evidenciando seu potencial como espaços multifuncionais capazes de produzir alimentos, conservar a biodiversidade e ampliar a oferta de serviços ecossistêmicos. Essa mudança de paradigma é sintetizada na Figura 20 (Miccolis *et al.*, 2016; Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022; Egidio; Souza, 2025;).



Figura 20. Sistemas Agroflorestais como estratégia de restauração produtiva: integração entre regularização ambiental, conservação da biodiversidade e geração de renda. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Dessa forma, a ampliação dos SAFs na cafeicultura depende do fortalecimento da assistência técnica, do acesso a crédito rural específico, da valorização comercial dos produtos sustentáveis e da consolidação de mecanismos que facilitem a regularização ambiental via sistemas produtivos. Somente por intermédio do alinhamento entre políticas públicas contínuas de incentivo e o protagonismo dos agricultores será possível mitigar as incertezas econômicas iniciais, transformando os desafios estruturais em janelas de oportunidade para uma cafeicultura moderna, legalmente segura e ecologicamente regenerativa.

5.1. Custos de implantação e retorno econômico

A implantação dos SAFs requer investimentos iniciais superiores aos normalmente observados nos sistemas convencionais de monocultivo, constituindo um dos principais desafios para sua adoção, sobretudo entre agricultores familiares. A aquisição de mudas de diferentes espécies arbóreas e agrícolas, a preparação da área, o planejamento do arranjo espacial, a implantação da infraestrutura, a proteção das mudas e a maior demanda por mão de obra especializada durante os primeiros anos elevam significativamente os custos de estabelecimento do sistema. Além disso, o maior nível de complexidade inerente aos SAFs exige planejamento técnico criterioso e acompanhamento contínuo, fatores que podem ampliar os investimentos iniciais quando comparados aos sistemas agrícolas simplificados (Miccolis *et al.*, 2016; Mendonça *et al.*, 2026).

Entretanto, a avaliação econômica dos SAFs não deve restringir-se aos custos de implantação, mas considerar todo o ciclo de vida do agroecossistema. Diferentemente dos monocultivos, cuja rentabilidade depende predominantemente de uma única cultura e, conseqüentemente, está mais sujeita às oscilações de preços, eventos climáticos extremos e problemas fitossanitários, os SAFs distribuem a geração de receitas ao longo do tempo por meio da produção simultânea de café, frutas, madeira, sementes, palmito, mel e outros produtos florestais madeireiros e não madeireiros. Essa diversificação produtiva reduz a vulnerabilidade econômica da propriedade, melhora o fluxo de caixa, amplia as oportunidades de comercialização e fortalece a capacidade de adaptação do produtor frente às oscilações do mercado agrícola (Nair, 1993; Miccolis *et al.*, 2016; FAO, 2022).

Durante a fase inicial de implantação, espécies de crescimento rápido e retorno econômico precoce desempenham papel estratégico na sustentabilidade financeira do sistema. Culturas como bananeira (*Musa spp.*), mamoeiro (*Carica papaya*) e outras frutíferas produzem receitas ainda nos primeiros anos, contribuindo para amortizar parte dos investimentos realizados na formação do SAF (Montagnini; Nair, 2004; Mendonça *et al.*, 2026).

Em médio prazo, para esses mesmos autores, espécies como a pupunheira (*Bactris gasipaes*) e a noqueira-macadâmia (*Macadamia integrifolia*) ampliam a

diversificação econômica da propriedade, enquanto árvores destinadas à produção de madeira de alto valor agregado constituem uma importante reserva patrimonial para colheitas futuras. Dessa forma, a lógica econômica dos SAFs baseia-se na distribuição temporal das receitas, promovendo maior estabilidade financeira e reduzindo a exposição do produtor aos riscos inerentes à dependência exclusiva da cafeicultura.

Outro aspecto frequentemente negligenciado refere-se à redução gradual dos custos operacionais proporcionada pelo amadurecimento ecológico do sistema. À medida que aumenta a produção de biomassa, intensifica-se a ciclagem de nutrientes, acumulam-se teores mais elevados de matéria orgânica e fortalece-se a atividade biológica do solo, ocorre uma diminuição progressiva da dependência de fertilizantes minerais, corretivos e defensivos agrícolas (Gliessman, 2015; Miccolis *et al.*, 2016; Lal, 2020).

Paralelamente, de acordo com esses mesmos autores, a melhoria do microclima, da estrutura física do solo, da retenção de água e da biodiversidade funcional contribui para reduzir gastos relacionados à irrigação suplementar, ao manejo de plantas espontâneas e ao controle fitossanitário. Como consequência, parte dos investimentos iniciais é compensada pela redução dos custos recorrentes de produção, aumentando a eficiência econômica do sistema no longo prazo.

Sob essa perspectiva, os investimentos realizados durante a implantação dos SAFs devem ser compreendidos como a construção do capital ecológico da propriedade, entendido como o conjunto de processos ecológicos, recursos naturais e serviços ecossistêmicos capazes de sustentar a produtividade agrícola ao longo do tempo. Diferentemente do monocultivo, que depende de aportes contínuos de insumos externos para manter sua produtividade, os SAFs tendem a ampliar progressivamente sua capacidade de autorregulação, reciclagem de nutrientes, conservação dos recursos naturais e estabilidade produtiva (Altieri, 2012; Gliessman, 2015; Miccolis *et al.*, 2016; Mendonça *et al.*, 2026).

Assim, embora o período de retorno financeiro possa ser relativamente mais longo quando comparado aos sistemas convencionais, a diversificação das fontes de renda, a redução da dependência de insumos externos, a maior

resiliência frente às mudanças climáticas e a valorização crescente de produtos obtidos sob bases sustentáveis, tornam os SAFs uma estratégia economicamente sólida e ambientalmente estratégica para a cafeicultura contemporânea (*ibidem*).

A formação desse capital ecológico também amplia a capacidade da propriedade de responder às oscilações ambientais e econômicas que caracterizam a agricultura contemporânea. Agroecossistemas mais biodiversos tendem a apresentar maior estabilidade funcional, reduzindo a variabilidade da produção entre safras e diminuindo os riscos associados a eventos climáticos extremos, surtos de pragas, doenças e flutuações no preço dos insumos agrícolas. Além disso, a crescente valorização dos serviços ecossistêmicos, das certificações socioambientais, dos mercados de cafés especiais e das políticas voltadas à agricultura de baixo carbono agrega novas oportunidades de geração de renda, ampliando a competitividade das propriedades agroflorestais. Dessa forma, o capital ecológico acumulado ao longo do processo sucessional passa a constituir também um importante ativo econômico, fortalecendo a sustentabilidade financeira dos SAFs no longo prazo (Altieri, 2012; Gliessman, 2015; Miccolis *et al.*, 2016; Lal, 2020; Mendonça *et al.*, 2026).

5.2. Assistência técnica e capacitação dos produtores

Entre os principais desafios para a expansão dos SAFs na cafeicultura, destaca-se a insuficiência de assistência técnica e extensão rural (ATER) especializada em agroecologia e manejo agroflorestal. Embora o acesso às informações técnicas tenha aumentado significativamente nas últimas décadas, muitos produtores ainda encontram dificuldades para obter orientação qualificada sobre planejamento, implantação, condução e monitoramento desses sistemas (Araújo, 2019).

Em grande parte das regiões produtoras, os serviços de assistência técnica permanecem fortemente direcionados aos modelos convencionais de produção, priorizando recomendações voltadas ao monocultivo e ao uso intensivo de insumos externos. Além disso, a implantação de SAFs exige conhecimentos específicos sobre sucessão ecológica, consórcios de espécies, manejo da

biomassa, fertilidade do solo e dinâmica das interações ecológicas, tornando indispensável a atuação integrada entre pesquisa, assistência técnica e agricultores para o sucesso desses sistemas (Caporal; Costabeber, 2004; Souza *et al.*, 2017; Araújo, 2019; Padovan *et al.*, 2024; Malaquias *et al.*, 2024).

Essa limitação decorre, em parte, da própria complexidade dos SAFs. Diferentemente dos cultivos convencionais, os SAFs exigem conhecimentos integrados sobre ecologia, fisiologia vegetal, conservação do solo e da água, sucessão ecológica, manejo do sombreamento, ciclagem de nutrientes, biodiversidade funcional e planejamento econômico da propriedade. Assim, o profissional responsável pela assistência técnica necessita compreender o agroecossistema como um organismo dinâmico, no qual solo, plantas, fauna, clima e atividade humana estabelecem relações permanentes de interdependência (Souza; Alves; Dan, 2017; Padovan *et al.*, 2024).

Outro aspecto relevante refere-se ao caráter contínuo da assistência técnica. A implantação de um SAF não representa uma intervenção pontual, mas o início de um processo de acompanhamento permanente. O desenvolvimento das espécies, a evolução da sucessão vegetal, as intervenções de poda, a introdução de novos componentes e as adaptações decorrentes das condições climáticas exigem monitoramento periódico e ajustes constantes ao longo dos anos. Dessa forma, programas de ATER baseados em visitas esporádicas tendem a apresentar resultados limitados quando aplicados a sistemas agroflorestais de elevada complexidade (Caporal; Costabeber, 2004; Souza *et al.*, 2017; Araújo, 2019; Malaquias *et al.*, 2024; Padovan *et al.*, 2024).

Além da qualificação dos extensionistas, a capacitação dos próprios agricultores constitui elemento essencial para o sucesso dos SAFs. A adoção dos SAFs pressupõe mudanças na forma de compreender a propriedade rural, substituindo a lógica da simplificação produtiva por uma visão sistêmica baseada nas interações ecológicas e na gestão integrada dos recursos naturais. Nesse contexto, cursos de formação, dias de campo, unidades demonstrativas, intercâmbios entre agricultores, metodologias participativas e redes de aprendizagem desempenham papel estratégico na difusão do conhecimento agroecológico, na redução das incertezas relacionadas à implantação desses

sistemas e no fortalecimento da autonomia dos produtores rurais (Caporal; Costabeber, 2004; Araújo, 2019; Malaquias *et al.*, 2024; Padovan *et al.*, 2024).

Experiências desenvolvidas por instituições de pesquisa, universidades, institutos federais, cooperativas e organizações de assistência técnica demonstram que propriedades acompanhadas de forma continuada apresentam maior eficiência na implantação dos SAFs, menor índice de mortalidade das mudas, melhor planejamento espacial das espécies, manejo mais adequado da biomassa e maior estabilidade produtiva ao longo do tempo. Essas experiências evidenciam que a assistência técnica não deve restringir-se à transferência de tecnologias, mas constituir um processo permanente de construção coletiva do conhecimento, integrando evidências científicas, inovação tecnológica e saberes acumulados pelos agricultores para promover sistemas produtivos mais resilientes e sustentáveis (Souza *et al.*, 2017; Araújo, 2019; Malaquias *et al.*, 2024; Padovan *et al.*, 2024).

Sob essa perspectiva, o fortalecimento da Assistência Técnica e Extensão Rural (ATER) constitui uma das principais estratégias para ampliar a adoção dos SAFs na cafeicultura brasileira. Investimentos na formação de equipes multidisciplinares, na produção de materiais técnicos, na criação de unidades de referência e na integração entre pesquisa, ensino, extensão e agricultores podem reduzir significativamente as dificuldades enfrentadas durante a transição agroecológica (Araújo, 2019; Malaquias *et al.*, 2024; Padovan *et al.*, 2024).

Além disso, políticas públicas voltadas ao fortalecimento da ATER desempenham papel decisivo na disseminação de tecnologias sustentáveis, na construção coletiva do conhecimento e na consolidação de sistemas produtivos mais resilientes. Dessa forma, a assistência técnica deixa de ser apenas um serviço de apoio e passa a constituir um dos pilares estruturantes para o desenvolvimento de uma cafeicultura agroflorestal mais produtiva, ambientalmente sustentável e socialmente inclusiva (Caporal; Costabeber, 2004; BRASIL, 2010; Araújo, 2019; Malaquias *et al.*, 2024; Padovan *et al.*, 2024).

5.3. Comercialização, certificação e acesso aos mercados

Embora os SAFs apresentem reconhecidos benefícios ambientais, sociais e produtivos, sua viabilidade depende também da capacidade de inserção dos produtos em mercados capazes de remunerar os atributos diferenciados desse modelo de produção. Na cafeicultura, esse desafio torna-se particularmente relevante, pois os custos iniciais de implantação e o maior tempo necessário para consolidação dos sistemas exigem mecanismos que agreguem valor ao produto final e ampliem a rentabilidade da atividade (Perfecto; Vandermeer, 2010; Chetro *et al.*, 2024).

Os cafés produzidos em SAFs frequentemente apresentam características associadas à sustentabilidade ambiental, à conservação da biodiversidade, ao menor uso de insumos químicos e à maior rastreabilidade do processo produtivo. Esses atributos atendem a uma demanda crescente dos mercados consumidores, especialmente daqueles voltados aos cafés especiais e aos produtos certificados, nos quais aspectos relacionados à origem, responsabilidade socioambiental e qualidade sensorial exercem influência direta sobre a formação dos preços (Specialty Coffee Association, 2023).

A inserção dos SAFs em mercados diferenciados constitui um dos principais mecanismos para ampliar sua viabilidade econômica e fortalecer a competitividade da cafeicultura sustentável. Nesse contexto, os sistemas de certificação assumem papel estratégico ao reconhecer práticas produtivas que conciliam conservação ambiental, responsabilidade social e qualidade do produto. Certificações como a Produção Orgânica, o *Fairtrade* (Comércio Justo) e a *Rainforest Alliance* possibilitam o acesso a nichos de mercado com maior valor agregado, ampliam a confiança dos consumidores e fortalecem a inserção dos produtores em cadeias produtivas orientadas por critérios de sustentabilidade e rastreabilidade (Fairtrade International, 2023; Rainforest Alliance, 2023).

Além do diferencial comercial, essas certificações estimulam a adoção de práticas relacionadas à conservação da biodiversidade, proteção dos recursos hídricos, melhoria das condições de trabalho, transparência da cadeia produtiva e adaptação às mudanças climáticas, contribuindo para a sustentabilidade ambiental, social e econômica das propriedades rurais.

Entretanto, a obtenção e a manutenção dessas certificações ainda representam desafios significativos, especialmente para agricultores familiares. Os custos associados às auditorias, às adequações estruturais, ao monitoramento de indicadores, à rastreabilidade da produção e ao cumprimento das exigências técnicas podem limitar o acesso de pequenos produtores aos mercados certificados. Estudos recentes demonstram que, embora os programas de certificação promovam benefícios ambientais e ampliem oportunidades comerciais, sua efetividade depende do fortalecimento das organizações de produtores, da assistência técnica continuada e da existência de mecanismos que reduzam os custos de conformidade e ampliem a inclusão dos agricultores familiares (Fairtrade International, 2023; Jones, 2024).

Nesse cenário, cooperativas, associações e organizações de produtores desempenham papel fundamental na viabilização econômica das certificações. A atuação coletiva permite compartilhar custos de auditoria, assistência técnica, infraestrutura de beneficiamento, rastreabilidade e comercialização, além de fortalecer o poder de negociação junto às torrefadoras, exportadoras e compradores internacionais. Essa organização também favorece a padronização da qualidade, amplia a escala de produção e facilita o atendimento às exigências impostas pelos mercados especializados, tornando a certificação mais acessível aos pequenos produtores (Fairtrade International, 2023; Jones, 2024).

Além das certificações formais, a valorização econômica dos cafés produzidos em SAFs está estreitamente relacionada à identidade territorial, à origem geográfica e à rastreabilidade da produção. Instrumentos como as Indicações Geográficas (IGs) e as Denominações de Origem (DOs) evidenciam que atributos ambientais, históricos, culturais e produtivos podem ser incorporados ao valor comercial do café (Vardiero *et al.*, 2024).

No caso da região do Caparaó, por exemplo, a combinação entre altitude, condições edafoclimáticas, tradição produtiva e práticas sustentáveis constitui importante diferencial competitivo, fortalecendo a reputação regional e agregando valor aos cafés especiais. Dessa forma, a biodiversidade dos SAFs, a conservação da paisagem, o manejo regenerativo e a elevada qualidade sensorial da bebida deixam de representar apenas benefícios ambientais e

passam a configurar atributos reconhecidos e valorizados pelo mercado (Bento *et al.*, 2022; Fernandes *et al.*, 2025).

Outro fator determinante refere-se à crescente demanda por produtos alinhados aos princípios da economia de baixo carbono e aos critérios ambientais, sociais e de governança (ESG). Empresas exportadoras, indústrias torrefadoras e grandes redes varejistas têm incorporado requisitos relacionados à rastreabilidade, à redução das emissões de carbono, à conservação da biodiversidade, ao respeito aos direitos humanos e à transparência das cadeias produtivas. Nesse contexto, os SAFs apresentam vantagens competitivas expressivas, uma vez que conciliam produção agrícola, conservação dos recursos naturais, sequestro de carbono, proteção dos recursos hídricos e fortalecimento da agricultura familiar, atributos cada vez mais valorizados pelos mercados internacionais e pelos consumidores (Rainforest Alliance, 2023; Jones, 2024).

Apesar desse cenário promissor, a consolidação dos mercados de cafés agroflorestais depende da ampliação de políticas públicas de incentivo, da expansão dos programas de assistência técnica, da redução dos custos de certificação, do fortalecimento das cooperativas e da capacitação dos produtores em estratégias de comercialização, *marketing* e agregação de valor.

O desafio da comercialização, portanto, ultrapassa a simples venda do café, envolvendo a construção de cadeias produtivas capazes de reconhecer e remunerar os múltiplos serviços ecossistêmicos proporcionados pelos SAFs, como o sequestro de carbono, a conservação da biodiversidade, a proteção dos recursos hídricos e a recuperação da qualidade do solo.

Dessa forma, o acesso a mercados diferenciados consolida-se como um componente estratégico para garantir a viabilidade econômica da transição agroecológica e fortalecer a cafeicultura agroflorestal como modelo produtivo competitivo, resiliente e ambientalmente sustentável.

5.4. Barreiras culturais e políticas públicas

A adoção dos SAFs na cafeicultura não depende exclusivamente da disponibilidade de tecnologias ou da viabilidade econômica desses sistemas.

Aspectos culturais, institucionais e políticos exercem influência decisiva sobre a velocidade da transição agroecológica, condicionando a disposição dos agricultores para incorporar novos modelos de produção e a capacidade do Estado em criar instrumentos capazes de estimular essa transformação (Caporal; Costabeber, 2004; Altieri; Nicholls, 2020).

Durante décadas, a modernização da agricultura brasileira foi fortemente orientada pelo paradigma da especialização produtiva e da intensificação do uso de insumos externos. Como consequência, consolidou-se entre muitos agricultores a percepção de que sistemas simplificados seriam sinônimo de maior eficiência técnica e econômica. Essa construção histórica ainda influencia parte do setor produtivo, fazendo com que os SAFs sejam, por vezes, interpretados como modelos excessivamente complexos, de difícil manejo ou incompatíveis com elevados níveis de produtividade, apesar das evidências científicas demonstrarem resultados opostos em diversas regiões produtoras (Gliessman, 2015; Miccolis *et al.*, 2016).

Outro fator limitante refere-se à natural resistência às mudanças inerente aos processos de inovação tecnológica. A implantação de um SAF exige alterações significativas no planejamento da propriedade, na organização do trabalho, na condução da lavoura e na própria forma de compreender a relação entre produção agrícola e funcionamento dos ecossistemas. Nesse contexto, experiências bem-sucedidas, unidades demonstrativas, intercâmbios entre agricultores e programas permanentes de capacitação desempenham papel estratégico na redução das incertezas e no fortalecimento da confiança dos produtores durante a transição agroecológica (Caporal; Costabeber, 2004; Araújo, 2019; Padovan *et al.*, 2024).

Além das barreiras culturais, a consolidação dos SAFs depende da existência de políticas públicas permanentes capazes de reduzir os riscos associados à fase inicial de implantação. Linhas de crédito específicas, assistência técnica continuada, incentivos fiscais, programas de capacitação e instrumentos de pagamento por serviços ambientais constituem mecanismos fundamentais para ampliar a adoção desses sistemas, sobretudo entre agricultores familiares, cuja capacidade de investimento frequentemente é limitada (Miccolis *et al.*, 2016; Araújo, 2019; Egidio; Souza, 2025).

Nesse cenário, a legislação ambiental brasileira também pode assumir papel indutor da transição agroecológica. A possibilidade de utilização de SAFs na recomposição de Áreas de Preservação Permanente (APPs) e de Reserva Legal (RL), especialmente nas condições previstas pela Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, permite compatibilizar conservação ambiental, regularização fundiária e geração de renda nas propriedades rurais. Para a agricultura familiar, essa abordagem representa uma importante oportunidade para transformar áreas anteriormente percebidas como restrições produtivas em espaços capazes de conciliar restauração ecológica e produção sustentável (Brasil, 2012; Egidio; Souza, 2025).

Ao integrar espécies florestais nativas, cafeeiros e outras culturas de interesse econômico, o produtor converte áreas destinadas à recomposição ambiental em agroecossistemas multifuncionais, capazes de produzir alimentos, conservar a biodiversidade, proteger os recursos hídricos e ampliar a conectividade da paisagem. Essa mudança de paradigma demonstra que a conservação ambiental não deve ser compreendida como obstáculo ao desenvolvimento rural, mas como elemento estruturante de modelos produtivos mais resilientes e competitivos (Araújo, 2019; Martins *et al.*, 2022; Padovan *et al.*, 2024).

A expansão dos SAFs, portanto, não depende exclusivamente da decisão individual dos agricultores ou da disponibilidade de tecnologias de produção. Trata-se de um processo sistêmico, condicionado pela interação entre instrumentos legais, políticas públicas, assistência técnica, pesquisa científica, incentivos econômicos e mudanças socioculturais capazes de favorecer a adoção de modelos produtivos mais sustentáveis. A compreensão integrada dessas relações é fundamental para explicar os fatores que impulsionam, ou limitam, a consolidação da cafeicultura agroflorestal.

A Figura 21 sintetiza essa integração entre políticas públicas, instrumentos de incentivo e mudanças socioculturais, evidenciando como esses fatores podem atuar conjuntamente para ampliar a adoção dos SAFs na cafeicultura e fortalecer a transição para modelos de produção mais sustentáveis.



Figura 21. Integração entre barreiras culturais, políticas públicas e instrumentos de incentivo na expansão dos Sistemas Agroflorestais cafeeiros. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (ChatGPT).

A análise integrada apresentada na Figura 21 evidencia que a expansão dos SAFs depende da atuação simultânea de fatores técnicos, institucionais, econômicos e socioculturais. A adoção desses sistemas não está condicionada apenas à disponibilidade de tecnologias ou ao interesse individual dos agricultores, mas resulta da articulação entre assistência técnica qualificada, pesquisa científica, políticas públicas permanentes, instrumentos de incentivo econômico e processos contínuos de construção e compartilhamento do conhecimento. A literatura demonstra que a interação entre esses componentes reduz os riscos inerentes à transição agroecológica, fortalece a capacidade de inovação dos produtores e amplia as condições para a consolidação de sistemas produtivos mais resilientes e sustentáveis (Caporal; Costabeber, 2004; Gliessman, 2015; Miccolis *et al.*, 2016; Altieri; Nicholls, 2020).

Nesse contexto, os SAFs demonstram que a conservação ambiental pode constituir um importante vetor de desenvolvimento territorial sustentável. Ao integrar espécies florestais, cafeeiros e outras culturas agrícolas, esses sistemas permitem compatibilizar a recuperação de Áreas de Preservação Permanente (APPs) e de Reservas Legais (RL) com a produção de alimentos, a geração de

renda, a conservação da biodiversidade, o sequestro de carbono e a provisão de serviços ecossistêmicos. Essa abordagem rompe com a dicotomia historicamente estabelecida entre produção e conservação, evidenciando que ambas podem atuar de forma complementar quando fundamentadas nos princípios da agroecologia, da gestão integrada da paisagem e do manejo sustentável dos recursos naturais (Gliessman, 2015; Martins *et al.*, 2022; Egidio; Souza, 2025).

Em consonância com as diretrizes internacionais para o desenvolvimento sustentável, os SAFs também contribuem diretamente para a construção de sistemas alimentares mais resilientes, para a adaptação às mudanças climáticas, para a conservação da biodiversidade e para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, atendendo simultaneamente a diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente aqueles relacionados à erradicação da fome, à ação climática, à conservação dos ecossistemas terrestres e à produção sustentável de alimentos (FAO, 2023).

Dessa forma, a cafeicultura agroflorestal ultrapassa a condição de uma alternativa tecnológica e consolida-se como um novo paradigma de desenvolvimento rural. Nesse modelo, competitividade econômica, conservação dos recursos naturais, adaptação às mudanças climáticas, fortalecimento da agricultura familiar e inclusão social deixam de representar objetivos conflitantes para constituírem dimensões complementares e indissociáveis de um mesmo processo de desenvolvimento sustentável, capaz de promover simultaneamente segurança alimentar, resiliência dos agroecossistemas, valorização dos territórios rurais e maior sustentabilidade da cadeia produtiva do café (Altieri; Nicholls, 2020; FAO, 2023).

Seção 6

Termodinâmica, fluxos de energia e sustentabilidade nos SAFs

No âmbito da ecologia de sistemas, a classificação de um ambiente depende da natureza de suas trocas com o meio externo. Segundo Odum e Barrett (2007), os ecossistemas são sistemas abertos, caracterizados pela constante entrada e saída de energia e matéria. Entretanto, a sustentabilidade desses sistemas depende da eficiência com que tais fluxos são captados, transformados e reutilizados internamente.

Sob essa perspectiva, os SAFs apresentam vantagens ecológicas e termodinâmicas significativas em relação ao modelo convencional de monocultura. Essa superioridade termodinâmica decorre da capacidade dos arranjos biodiversos em dissipar menos energia útil e manter a integridade de suas funções ecossistêmicas por meio de redes tróficas complexas, aproximando os agroecossistemas do comportamento autorregulador dos sistemas naturais maduros (Andrade *et al.*, 2020).

A agricultura convencional moderna fundamenta-se em um padrão linear de funcionamento, baseado na extração intensiva de recursos naturais e na elevada dependência de insumos externos. Esse modelo reduz drasticamente a biodiversidade funcional do agroecossistema, simplificando os fluxos ecológicos e comprometendo a capacidade de autorregulação do ambiente (Gliessman, 2009). Como consequência, ocorre um aumento expressivo da entropia do sistema produtivo, uma vez que grande parte da energia incorporada se dissipa sem ser reaproveitada internamente, gerando passivos ambientais crônicos que aceleram a degradação dos solos e a perda de resiliência climática regional (Malaquias *et al.*, 2024).

De acordo com Odum (1971), sistemas agrícolas altamente industrializados demandam contínuos aportes energéticos externos, tais como fertilizantes sintéticos, combustíveis fósseis, agrotóxicos e irrigação, para manter sua estabilidade produtiva, tornando-se energeticamente ineficientes no longo prazo. Essa dependência estabelece uma escala de degradação termodinâmica que

diferencia drasticamente o manejo convencional das alternativas de base biológica.

Atualmente, análises de balanço energético confirmam que a substituição desses insumos industriais de alta energia fóssil por processos ecológicos endógenos, como a fixação biológica de nitrogênio e a ciclagem profunda de nutrientes pelas podas nos SAFs, maximiza a eficiência emergética do sistema, reduzindo a pegada de carbono e blindando a atividade cafeeira contra as oscilações econômicas e climáticas globais (Santos *et al.*, 2021; Salvador *et al.*, 2025).

A comparação entre os modelos convencional, orgânico e agroflorestal evidencia que a sustentabilidade não depende apenas da origem dos insumos utilizados, sobretudo da capacidade do sistema em internalizar processos ecológicos fundamentais. A mera substituição de insumos sintéticos por insumos orgânicos, característica do modelo orgânico básico, ainda pode manter uma dependência estrutural caso permaneça a lógica produtiva do monocultivo. Sob a ótica termodinâmica, os SAFs representam um estágio mais avançado de transição agroecológica, promovendo maior retenção, reciclagem e eficiência no uso da energia disponível.

A distinção entre os diferentes modelos produtivos torna-se ainda mais evidente quando analisada sob uma perspectiva sistêmica. Enquanto os sistemas convencionais concentram sua estabilidade na utilização contínua de insumos externos, os sistemas orgânicos reduzem parte dessa dependência ao substituir insumos sintéticos por alternativas de origem biológica, sem necessariamente modificar a estrutura ecológica do agroecossistema. Os SAFs, por sua vez, promovem uma reorganização funcional dos fluxos de energia e matéria, incorporando biodiversidade, ciclagem de nutrientes, cobertura permanente do solo, controle biológico e múltiplos estratos vegetais como componentes estruturantes da produção. Essa evolução do manejo agroecológico é sintetizada na Figura 21, que compara os principais atributos ecológicos, produtivos e termodinâmicos dos modelos convencional, orgânico básico e agroflorestal.



Figura 21. Matriz comparativa de transição agroecológica: indicadores de insumos, saúde do solo, controle biológico e resiliência climática entre os modelos convencional, orgânico básico e SAF (Padrão Ouro). Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A Figura 21 sintetiza essa evolução dos sistemas produtivos sob a perspectiva da sustentabilidade, evidenciando que a transição agroecológica não se restringe à substituição de insumos, mas envolve uma profunda reorganização dos fluxos de energia, da ciclagem de nutrientes e das interações ecológicas. À medida que aumenta a diversidade biológica do agroecossistema, ampliam-se simultaneamente sua eficiência energética, sua capacidade de autorregulação e sua resiliência frente às perturbações ambientais.

A presença simultânea de árvores, culturas agrícolas e espécies de cobertura amplia a interceptação da radiação solar em diferentes estratos vegetais, aumentando a eficiência fotossintética global do agroecossistema (Nair, 1993). Essa organização estrutural e a estratificação vertical reduzem drasticamente as perdas energéticas por dissipação (entropia) e favorece a transformação da biomassa em matéria orgânica estável, intensificando e fechando os ciclos biogeoquímicos internamente. Sob a ótica da termodinâmica ecológica, esse arranjo maximiza a captura de exergia² (energia útil), permitindo

² O termo é um conceito muito utilizado na física e termodinâmica, derivado do grego, e refere-se à quantidade máxima de trabalho útil que um sistema pode produzir; ou seja, é o trabalho útil máximo que um sistema pode produzir ao entrar em equilíbrio com o ambiente ao seu redor.

que o agroecossistema utilize a complexidade biológica para se auto-organizar e manter o metabolismo produtivo com o mínimo de dissipação energética para o ambiente externo (Andrade *et al.*, 2020).

Essa dinâmica demonstra que a sustentabilidade dos SAFs não resulta apenas da diversificação de espécies, mas da reorganização dos processos ecológicos que sustentam o funcionamento do agroecossistema. À medida que aumenta a eficiência na captura, no armazenamento e na reciclagem da energia, reduzem-se simultaneamente a necessidade de insumos externos, a vulnerabilidade às oscilações climáticas e os impactos ambientais associados à produção agrícola. Na cafeicultura, essa maior eficiência energética traduz-se em sistemas mais resilientes, capazes de manter a produtividade, conservar os recursos naturais e ampliar a oferta de serviços ecossistêmicos, aproximando o manejo agrícola do funcionamento dos ecossistemas naturais maduros (Odum; Barrett, 2007; Gliessman, 2009; Yang; Xiong; Xiao, 2024).

A dinâmica ecológica dos SAFs aproxima-se do funcionamento dos ecossistemas florestais naturais, nos quais a produção de biomassa, a decomposição e a ciclagem de nutrientes ocorrem de maneira contínua e integrada. Segundo Primavesi (2002), a manutenção permanente da cobertura do solo constitui um dos principais fatores responsáveis pela estabilidade ecológica dos sistemas agrícolas tropicais. Da mesma forma, nos SAFs, a elevada diversidade biológica e a intensa reciclagem interna de recursos favorecem maior estabilidade, resiliência e eficiência energética ao longo do tempo, aproximando o manejo agrícola do comportamento funcional dos ecossistemas naturais maduros (Odum, 1971; Gliessman, 2009; Yang; Xiong; Xiao, 2024).

A deposição contínua de resíduos vegetais provenientes das podas, da serapilheira e da adubação verde constitui um dos principais mecanismos responsáveis pela manutenção dos fluxos internos de matéria e energia nos SAFs. Esse aporte permanente de fitobiomassa reduz a amplitude térmica do solo, eleva a retenção de água e estimula a atividade microbiológica, favorecendo a mineralização da matéria orgânica, a ciclagem de nutrientes e a

Diferente da energia total, que é sempre conservada, a exergia mede a qualidade e a capacidade real de uma energia realizar trabalho. Ela é o “potencial de aproveitamento” da energia.

manutenção da fertilidade natural. Paralelamente, o aumento da disponibilidade de substrato orgânico favorece o desenvolvimento da macrofauna e da mesofauna edáfica, cuja atividade biológica intensifica os processos de humificação, promove a formação de agregados estáveis e contribui para a supressividade natural do solo frente a diversos fitopatógenos (Martins *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2024; Sá *et al.*, 2025).

Nesse contexto, destaca-se o carbono orgânico do solo (COS), considerado um dos principais compartimentos de armazenamento de carbono nos ecossistemas terrestres e um indicador fundamental da qualidade e da sustentabilidade dos sistemas agrícolas e florestais (Tadini *et al.*, 2021). Nos SAFs, a acumulação de COS é favorecida pelo aporte contínuo de serapilheira, raízes e resíduos vegetais, que intensificam a ciclagem de nutrientes e promovem o sequestro de carbono atmosférico. Além de contribuir para a mitigação das mudanças climáticas, o incremento dos estoques de carbono melhora os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, aumentando a capacidade de troca de cátions, a retenção de nutrientes, a estabilidade estrutural e a disponibilidade hídrica, fatores diretamente relacionados à produtividade e à resiliência dos agroecossistemas (Bini *et al.*, 2013).

Em contraste, sistemas agrícolas conduzidos sob manejo convencional tendem a reduzir progressivamente os estoques de carbono orgânico do solo em razão do revolvimento frequente, da simplificação da cobertura vegetal e da menor incorporação de resíduos orgânicos. A perda de carbono orgânico total (COT) e de nitrogênio compromete a fertilidade, reduz a atividade biológica e limita a capacidade do solo de sustentar elevados níveis de produtividade ao longo do tempo, evidenciando a necessidade de práticas conservacionistas que favoreçam a reconstrução da matéria orgânica e dos processos ecológicos associados (Assunção *et al.*, 2019).

O aumento dos estoques de carbono no solo integra um processo mais amplo de conservação e sequestro de carbono promovido pelos SAFs. A elevada produção de biomassa arbórea, associada ao aporte contínuo de resíduos vegetais e ao desenvolvimento de sistemas radiculares profundos, amplia a captura de carbono atmosférico e favorece seu armazenamento tanto na biomassa quanto nas diferentes camadas do solo. Sob essa perspectiva, os

SAFs desempenham importante papel na mitigação das mudanças climáticas, contribuindo simultaneamente para a conservação da biodiversidade, a melhoria do microclima e a estabilidade dos serviços ecossistêmicos (Tumnebai *et al.*, 2023; Chetro *et al.*, 2024).

Essa capacidade de conservar energia e acumular carbono está diretamente relacionada à elevada diversidade biológica característica dos SAFs. Conforme proposto por May (1973), ecossistemas estruturalmente mais complexos tendem a apresentar maior estabilidade funcional diante de perturbações ambientais. De forma semelhante, os SAFs aproximam-se do funcionamento dos ecossistemas florestais naturais, nos quais a produção de biomassa, a decomposição e a ciclagem de nutrientes ocorrem continuamente.

Segundo Primavesi (2002), a manutenção permanente da cobertura do solo constitui um dos principais fatores responsáveis pela estabilidade ecológica dos sistemas agrícolas tropicais. Assim, a elevada diversidade funcional presente nos SAFs favorece mecanismos de autorregulação, amplia a eficiência energética do sistema e aumenta sua capacidade de adaptação frente às mudanças climáticas e às oscilações ambientais (Odum, 1971; Gliessman, 2009).

Entretanto, a transição para sistemas produtivos mais complexos pode envolver compromissos temporários entre produtividade imediata e sustentabilidade de longo prazo. Em determinadas condições, o crescimento vegetativo e o rendimento inicial da cultura principal podem ser superiores em sistemas de monocultivo quando comparados a arranjos agroflorestais. Schneider *et al.* (2025), por exemplo, observaram maior crescimento vegetativo e produtividade inicial do cacau em monocultivo. Todavia, esse desempenho inicial está frequentemente associado à maior dependência de fertilizantes minerais, agrotóxicos e outros insumos externos, fatores que elevam os custos de produção, intensificam os impactos e externalidades ambientais e comprometem progressivamente a qualidade do solo e a resiliência do sistema produtivo (Yilmaz; Yilmaz, 2025).

A importância do carbono orgânico do solo (COS) transcende sua função como reservatório de carbono atmosférico. Sua relevância decorre da influência direta sobre a estrutura física do solo, a ciclagem biogeoquímica de nutrientes,

a dinâmica da água, a atividade microbiana e a manutenção da biodiversidade edáfica, processos que sustentam o funcionamento e a estabilidade dos agroecossistemas (Lal *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2020).

Em virtude dessa multiplicidade de funções ecossistêmicas, o COS é amplamente reconhecido como um dos principais indicadores da qualidade e da saúde do solo, constituindo a base para a provisão de diversos serviços ecossistêmicos, como a regulação climática, a conservação da fertilidade, o aumento da capacidade de retenção de água e o suporte à biodiversidade (Lal *et al.*, 2018).

Essa relação torna-se ainda mais evidente quando se analisam os efeitos do uso e manejo da terra sobre os estoques de carbono e a atividade biológica do solo. Evidências demonstram que ecossistemas sob vegetação nativa apresentam maiores teores de COS, maior biomassa microbiana e maior estabilidade ecológica em comparação com áreas submetidas a sistemas agrícolas convencionais, reforçando a importância de estratégias de manejo capazes de conservar ou incrementar os estoques de carbono no solo (Andrade *et al.*, 2020; Menezes *et al.*, 2021).

Nesse contexto, os SAFs destacam-se por reproduzirem diversos atributos funcionais das florestas naturais, como elevada diversidade vegetal, cobertura permanente do solo, aporte contínuo de serapilheira e intensa atividade biológica, condições que favorecem a incorporação e a estabilização do carbono orgânico ao longo do tempo (Menezes *et al.*, 2021; Tadini *et al.*, 2021).

Sob essa perspectiva, a conservação e o incremento dos estoques de COS constituem um dos principais mecanismos pelos quais a agroecologia promove a sustentabilidade dos sistemas produtivos. A adoção de práticas como diversificação de espécies, manutenção da cobertura vegetal, redução do revolvimento do solo e reciclagem da biomassa favorece simultaneamente a melhoria da fertilidade, o aumento da eficiência no uso da água, a intensificação da atividade biológica e o sequestro de carbono, contribuindo para o fortalecimento da resiliência dos agroecossistemas frente às mudanças climáticas (Lal *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2020; Tadini *et al.*, 2021).

Além dos benefícios edáficos, a maior complexidade estrutural dos SAFs também exerce papel relevante na regulação do microclima agrícola. A presença do componente arbóreo reduz a incidência direta da radiação solar, atenua as amplitudes térmicas, diminui a evaporação da água do solo e favorece a manutenção da umidade no ambiente produtivo. Esses efeitos contribuem para reduzir o estresse térmico das culturas e aumentar sua capacidade de adaptação aos eventos climáticos extremos, aspecto particularmente relevante para a sustentabilidade da cafeicultura capixaba diante dos cenários de aquecimento global e déficit hídrico (Lal *et al.*, 2018; Salvador *et al.*, 2025).

Sob essa perspectiva, a sustentabilidade dos SAFs extrapola a dimensão ecológica e reflete diretamente sobre a estabilidade econômica das propriedades rurais. A recente crise internacional do mercado de fertilizantes evidenciou a elevada vulnerabilidade dos sistemas agrícolas dependentes de nutrientes importados e combustíveis fósseis. Em contraste, os SAFs reduzem significativamente essa dependência ao substituir insumos industriais por processos ecológicos, como a fixação biológica de nitrogênio, a ciclagem de nutrientes, a cobertura permanente do solo e o controle biológico de pragas. Na cafeicultura, essa reorganização funcional diminui os custos operacionais, reduz a exposição às oscilações dos mercados internacionais e fortalece a autonomia produtiva e financeira das famílias agricultoras (Altieri, 2012; Malaquias *et al.*, 2024; Mendonça *et al.*, 2026).

Embora os sistemas convencionais de monocultivo tenham sido historicamente associados às maiores produtividades potenciais em condições ideais de cultivo, evidências científicas recentes demonstram que SAFs bem planejados podem alcançar produtividades equivalentes e, em determinadas condições ambientais e de manejo, superiores às observadas em cultivos conduzidos a pleno sol. Em uma meta-análise global envolvendo diferentes sistemas cafeeiros, Mokondoko *et al.* (2022) verificaram que cafezais agroflorestais submetidos a níveis moderados de sombreamento (entre aproximadamente 35 e 50%) mantiveram elevados níveis de produtividade, ao mesmo tempo em que apresentaram melhorias significativas na fertilidade do solo, na conservação da água, na biodiversidade funcional e na oferta de serviços ecossistêmicos. Os autores demonstram que o desempenho produtivo

dos SAFs depende principalmente do manejo da densidade arbórea e da intensidade do sombreamento, e não simplesmente da presença de árvores no sistema.

Esses resultados tornam-se ainda mais relevantes diante dos cenários de mudanças climáticas. Segundo Yang, Xiong e Xiao (2024), a maior complexidade estrutural dos SAFs favorece a reorganização dos processos ecológicos que sustentam a provisão de serviços ecossistêmicos, aumentando simultaneamente a eficiência no uso dos recursos naturais, a estabilidade funcional e a resiliência dos agroecossistemas.

Na cafeicultura, segundo Mendonça *et al.* (2026), o componente arbóreo reduz a temperatura do dossel, diminui a evapotranspiração, conserva a umidade do solo e atenua os efeitos do déficit hídrico e das ondas de calor, fatores que contribuem para maior estabilidade da produção ao longo dos anos. Dessa forma, a superioridade dos SAFs não deve ser avaliada exclusivamente pela produtividade anual, mas pela capacidade de manter níveis elevados de produção com menor dependência de insumos externos, menores riscos climáticos e maior sustentabilidade econômica e ambiental ao longo do ciclo produtivo.

Essa autonomia produtiva também fortalece a agricultura familiar e o desenvolvimento territorial sustentável. Ao diversificar a produção e reduzir a dependência de insumos externos, os SAFs ampliam as oportunidades de geração de emprego e renda, dinamizam as economias locais e distribuem os riscos produtivos entre diferentes culturas e produtos florestais. Dessa forma, os benefícios da diversificação extrapolam a dimensão ambiental e consolida-se como um importante mecanismo de fortalecimento socioeconômico da agricultura familiar, promovendo maior estabilidade da renda, diversificação das fontes de produção e desenvolvimento territorial sustentável (Pronti; Coccia, 2020).

Consequentemente, a sustentabilidade econômica da cafeicultura não pode ser compreendida exclusivamente a partir do aumento contínuo do uso de fertilizantes, corretivos e demais insumos externos. Em muitos casos, os limites produtivos estão associados à perda da funcionalidade biológica do solo e à redução da capacidade natural do agroecossistema em reciclar nutrientes,

armazenar água e sustentar processos ecológicos essenciais (Primavesi, 2002; Gliessman, 2009; Lal, 2020).

Dessa forma, a construção de sistemas mais resilientes depende do fortalecimento da biota edáfica, da intensificação da ciclagem de nutrientes e da promoção de interações ecológicas capazes de transformar o solo em um componente ativo da produtividade agrícola. A valorização dessa “inteligência biológica” do solo constitui um dos fundamentos da cafeicultura regenerativa, permitindo maior estabilidade produtiva frente aos veranicos, redução da dependência de insumos externos e fortalecimento da viabilidade econômica das propriedades rurais (Primavesi, 2002; Gliessman, 2009; Souza, 2018).

Assim, a biodiversidade deixa de representar apenas um atributo estrutural dos SAFs e passa a constituir um componente funcional responsável pela estabilidade ecológica, pela eficiência energética e pela sustentabilidade econômica dos agroecossistemas. Entretanto, essa estabilidade não resulta simplesmente do aumento do número de espécies presentes, mas da forma como essas espécies compartilham recursos, estabelecem relações ecológicas complementares e ocupam diferentes nichos funcionais. A compreensão desses mecanismos constitui um dos fundamentos ecológicos dos SAFs e fornece a base conceitual para discutir, no tópico seguinte, o papel dos nichos ecológicos e da complementariedade funcional na construção de agroecossistemas mais resilientes (MacArthur; Levins, 1967; MacArthur, 1972; Odum; Barrett, 2007; Gliessman, 2009; Altieri, 2012).

Seção 7

Nichos ecológicos, complementariedade funcional e resiliência nos SAFs

O Princípio da Exclusão Competitiva, formulado por Georgii Gause (1934), estabelece que duas espécies com nichos ecológicos idênticos não conseguem coexistir de forma estável por tempo indeterminado. Quando organismos exploram os mesmos recursos limitantes de maneira semelhante, ocorre intensa competição, levando à exclusão da espécie menos eficiente ou à diferenciação forçada de seus nichos (Gause, 1934).

Esse princípio ecológico fornece uma importante base teórica para compreender tanto a fragilidade das monoculturas convencionais quanto a elevada eficiência ecológica dos Sistemas Agroflorestais (SAFs). Na ecologia moderna, a superação dessa barreira competitiva em ambientes agrícolas manejados ocorre pelo direcionamento da diversidade funcional, onde a seleção de espécies é desenhada para maximizar a facilitação ecológica e minimizar a sobreposição de nichos (Andrade *et al.*, 2020).

Na monocultura agrícola, a homogeneidade biológica intensifica a competição intraespecífica e a saturação de nicho. Plantas da mesma espécie e com a mesma idade cronológica apresentam demandas nutricionais idênticas, exploram profundidades equivalentes do perfil do solo e competem simultaneamente e agressivamente por água, luz e nutrientes. Conforme destaca Gliessman (2009), essa simplificação ecológica reduz a complementariedade funcional do sistema e amplia sua vulnerabilidade a estresses ambientais e biológicos.

Esse cenário restritivo ilustra as consequências extremas da sobreposição de nichos ecológicos e da simplificação dos processos biológicos. Sob o impacto antrópico contínuo, essa competição crônica degrada as propriedades biofísicas do solo e exaure os horizontes superficiais, demandando aportes externos crescentes de fertilizantes e outros insumos para compensar a redução da

eficiência ecológica e energética do sistema produtivo (Souza, 2018; Malaquias *et al.*, 2024). Contudo, a própria ecologia demonstra que a coexistência de múltiplas espécies pode ocorrer quando existe diferenciação funcional e partilha de recursos, princípio que fundamenta a organização dos SAFs (Figura 22).



Figura 22. Competição e coexistência: fundamentos ecológicos que explicam a complementariedade funcional nos Sistemas Agroflorestais. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A aparente contradição entre exclusão competitiva e coexistência biológica observada em ecossistemas naturais ajuda a compreender o funcionamento dos SAFs. A diversificação de espécies e estratos vegetais promove a partilha de recursos e reduz a competição direta, criando condições favoráveis para a complementariedade funcional e para a estabilidade ecológica do sistema.

A dualidade conceitual apresentada na Figura 22 expõe uma das discussões centrais da ecologia de comunidades. À esquerda, o Princípio da Exclusão Competitiva de Gause prevê que organismos que exploram recursos idênticos tendem a competir intensamente, culminando na exclusão do competidor menos eficiente. Esse princípio ajuda a compreender por que sistemas simplificados, como as monoculturas agrícolas, apresentam elevada dependência de insumos externos para sustentar sua produtividade. Em contrapartida, o Paradoxo do Plâncton, proposto por Hutchinson (1961),

demonstra que múltiplas espécies podem coexistir em ambientes heterogêneos e dinâmicos, mesmo quando compartilham recursos semelhantes. Os SAFs incorporam essa lógica ecológica ao diversificar o espaço, os estratos vegetais e o tempo de utilização dos recursos, permitindo que diferentes espécies compartilhem o agroecossistema de forma complementar e sinérgica.

Entretanto, os avanços da ecologia de comunidades demonstram que a organização dos ecossistemas não depende apenas da redução da competição entre espécies. Além da partilha de recursos, diferentes organismos podem estabelecer interações positivas, fenômeno conhecido como facilitação ecológica, no qual determinadas espécies modificam o ambiente de forma a favorecer o crescimento, o desenvolvimento e a sobrevivência de outras. Nos SAFs, esse mecanismo amplia a eficiência funcional, fortalece a estabilidade ecológica e aumenta a capacidade de autorregulação do agroecossistema (Callaway, 2007)

Nos SAFs, a facilitação ecológica manifesta-se por diversos mecanismos complementares. Árvores leguminosas realizam a fixação biológica de nitrogênio, espécies de raízes profundas redistribuem água e nutrientes entre diferentes camadas do solo, copas arbóreas atenuam o estresse térmico das culturas agrícolas e a elevada diversidade vegetal favorece a formação de redes micorrízicas, o aumento da atividade biológica do solo e a intensificação da ciclagem de nutrientes. Dessa forma, a produtividade deixa de depender predominantemente da competição por recursos e passa a resultar da cooperação ecológica entre os diferentes componentes do sistema (Nair, 1993; Santos *et al.*, 2021; Sá *et al.*, 2025).

Além disso, a uniformidade genética típica dos monocultivos favorece a disseminação rápida de pragas e doenças. Segundo Carson (1962), a artificialização dos agroecossistemas rompe mecanismos naturais de equilíbrio ecológico, criando ambientes propícios para explosões populacionais de organismos-praga. Como consequência, a agricultura convencional torna-se dependente de defensivos agrícolas sintéticos, elevando os custos de produção e os impactos ecológicos.

Na cafeicultura convencional capixaba, esse cenário de simplificação ecológica favorece a ocorrência recorrente de surtos de importantes pragas,

como o bicho-mineiro (*Leucoptera coffeella*) e a broca-do-café (*Hypothenemus hampei*). A redução da diversidade vegetal e a homogeneização da paisagem diminuem a disponibilidade de abrigo, alimento e locais de reprodução para predadores, parasitoides e outros inimigos naturais, comprometendo os mecanismos de regulação biológica que naturalmente limitariam o crescimento dessas populações. Como consequência, a manutenção da produtividade torna-se fortemente dependente de intervenções químicas sucessivas, elevando os custos de produção, aumentando os riscos de resistência de pragas aos inseticidas e intensificando os impactos ambientais associados ao manejo fitossanitário (Pereira *et al.*, 2022; Pinheiro *et al.*, 2024).

Em contraste, os SAFs favorecem a reconstrução dessas redes ecológicas por meio da diversificação da vegetação e da ampliação da heterogeneidade ambiental. A presença de árvores, arbustos, plantas de cobertura e vegetação espontânea cria habitats capazes de sustentar populações mais abundantes e diversificadas de inimigos naturais, aumentando a eficiência do controle biológico e reduzindo a probabilidade de explosões populacionais de organismos-praga. Dessa forma, a biodiversidade funcional passa a desempenhar papel estratégico na proteção fitossanitária da cafeicultura, substituindo parte da dependência de defensivos químicos por processos ecológicos de autorregulação (Altieri, 2001; Pereira *et al.*, 2022; Pinheiro *et al.*, 2024).

Essa capacidade de autorregulação resulta diretamente da forma como as diferentes espécies ocupam o agroecossistema e estabelecem relações ecológicas complementares. Em vez de competir intensamente pelos mesmos recursos, árvores, cafeeiros, culturas associadas e plantas de cobertura distribuem-se espacial e funcionalmente, explorando diferentes nichos ecológicos e intensificando processos de facilitação, cooperação e ciclagem de recursos. É justamente essa organização funcional que diferencia os SAFs dos modelos convencionais de monocultivo.

Conforme descrito por Nair (1993), a estratificação vertical permite que diferentes espécies explorem distintos níveis de luminosidade: árvores emergentes interceptam radiação solar intensa, culturas arbustivas utilizam luz intermediária e espécies herbáceas aproveitam a luminosidade difusa do sub-

bosque. Essa partilha da radiação aperfeiçoa o balanço termodinâmico do sistema, reduzindo a entropia global por meio de múltiplos níveis de captura energética (Andrade *et al.*, 2020).

A complementariedade também ocorre abaixo da superfície. Espécies arbóreas de raízes profundas acessam nutrientes em camadas inferiores do solo, enquanto culturas superficiais exploram horizontes mais rasos. Esse mecanismo reduz a competição direta e intensifica a ciclagem de nutrientes, uma vez que elementos minerais absorvidos em profundidade retornam à superfície por meio da queda de folhas e resíduos vegetais (Assis; Oliveira, 2007). Esse fluxo vertical contínuo de fitobiomassa estimula a macrofauna edáfica, cuja atividade biológica atua como excelente bioindicadora da recuperação da fertilidade e da saúde do solo sob manejo agroflorestal (SÁ *et al.*, 2025).

Segundo Shiva (2003), a biodiversidade agrícola representa uma forma de inteligência ecológica acumulada historicamente pelos sistemas tradicionais de cultivo. A diversificação produtiva aumenta a estabilidade ecológica porque distribui os riscos entre diferentes espécies e reduz a vulnerabilidade a eventos climáticos extremos. Em SAFs cafeeiros, por exemplo, árvores sombreadoras reduzem os impactos de ondas de calor, melhoram a umidade relativa do ar e protegem o solo contra a erosão hídrica, salvaguardando a produção de café arábica e conilon perante os cenários severos de mudanças climáticas no território capixaba (Bigli *et al.*, 2024; Salvador *et al.*, 2025; Sousa *et al.*, 2025).

Outro aspecto central refere-se à resiliência ecológica. Conforme argumenta Holling (1973), sistemas resilientes não são aqueles que evitam perturbações, mas os que conseguem absorvê-las sem perder sua estrutura funcional. Nos SAFs, a diversidade biológica atua como mecanismo de amortecimento ecológico. Caso uma cultura apresente baixa produtividade ou depreciação de preço em determinado período, outras espécies, como fruteiras, leguminosas e essências madeireiras introduzidas no arranjo, compensam economicamente o sistema, reduzindo drasticamente os riscos financeiros e garantindo a viabilidade econômica e a robustez do fluxo de caixa do agricultor familiar (Mendonça *et al.*, 2026).

Sob a perspectiva agroecológica, os SAFs também promovem serviços ecossistêmicos fundamentais, como polinização, conservação da biodiversidade

e regulação biológica espontânea. A presença de diferentes espécies vegetais cria habitats complexos para polinizadores e inimigos naturais, como vespas predadoras e fungos entomopatógenos, além de viabilizar o uso de estratégias biotecnológicas, como armadilhas atrativas para o monitoramento populacional de insetos-praga (Viçosi *et al.*, 2026).

Conforme Altieri (2001), a estabilidade ecológica dos agroecossistemas depende diretamente da diversidade funcional presente na paisagem agrícola. Esse arranjo integrado gera interações sinérgicas que se desdobram tanto na estabilidade biofísica do agroecossistema quanto na viabilidade comercial da atividade. Tais interações demonstram que os benefícios dos SAFs não se restringem ao controle de pragas ou à conservação da biodiversidade, mas repercutem simultaneamente sobre a estabilidade produtiva, a adaptação climática e a viabilidade econômica da propriedade rural.

A integração entre esses processos ecológicos evidencia que os benefícios proporcionados pelos SAFs não atuam de forma isolada, mas constituem uma rede de interações capazes de fortalecer simultaneamente a estabilidade ecológica, a produtividade agrícola e a sustentabilidade econômica. A biodiversidade funcional passa a desempenhar um papel central na organização dos agroecossistemas, conectando mecanismos como o controle biológico, a ciclagem de nutrientes, a regulação microclimática e a diversificação produtiva em um sistema altamente resiliente. Essa relação integrada entre os principais serviços ecossistêmicos e seus reflexos sobre a atividade cafeeira é sintetizada na Figura 23.

Conforme sintetizado na Figura 23, os benefícios dos SAFs manifestam-se de forma integrada nas dimensões ecológica e econômica. No eixo biofísico, a combinação entre estabilidade microclimática, controle biológico natural, melhoria da estrutura do solo e maior eficiência na ciclagem de nutrientes contribui para aumentar a resiliência dos agroecossistemas frente aos estresses climáticos e biológicos. Paralelamente, no eixo socioeconômico, a diversificação produtiva, a redução da dependência de insumos externos, o acesso a mercados diferenciados e a conformidade ambiental favorecem maior estabilidade da renda e redução dos riscos associados à atividade agrícola. Dessa forma, a biodiversidade funcional atua como elemento integrador capaz de fortalecer

simultaneamente a sustentabilidade produtiva, ambiental e econômica da cafeicultura (Altieri, 2001; Mendonça *et al.*, 2026).



Figura 23. Efeitos da biodiversidade funcional sobre a resiliência ecológica e a sustentabilidade econômica dos Sistemas Agroflorestais. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Assim, enquanto a monocultura convencional intensifica a competição ecológica e a dependência tecnológica, os SAFs utilizam a complementariedade de nichos como estratégia de eficiência e estabilidade. A biodiversidade deixa de representar um obstáculo à produtividade e passa a constituir o principal mecanismo de resiliência edáfica, autonomia financeira e sustentabilidade de longo prazo dos sistemas agrícolas tropicais (Souza, 2018; Malaquias *et al.*, 2024).

Há de se considerar, ainda, o conceito de facilitação ecológica, amplamente discutida na agroecologia contemporânea. Diferentemente da perspectiva limitada apenas à redução da competição interespecífica proposta pelo Princípio de Gause, os SAFs são estruturados de modo que determinadas espécies exerçam funções ecológicas positivas sobre outras, promovendo interações mutualísticas e o aumento da eficiência funcional do sistema. Essa facilitação manifesta-se desde a transferência subterrânea de nitrogênio fixado por leguminosas arbóreas até a formação de redes micorrízicas comuns que

aperfeiçoam a hidrodinâmica e a solubilização de fósforo para o cafeeiro no sub-bosque (Santos *et al.*, 2021; Sá *et al.*, 2025).

A incorporação dessas interações ecológicas positivas constitui um dos pilares da transição agroecológica, cujo objetivo central é substituir a dependência de insumos externos pela intensificação dos processos biológicos naturais. Conforme destacam Toledo e Barrera-Bassols (2008), Altieri (2012) e Gliessman (2009; 2016), a transição agroecológica não se restringe à substituição de fertilizantes e defensivos convencionais por insumos biológicos, mas envolve uma profunda reorganização ecológica do sistema produtivo, baseada no fortalecimento da biodiversidade funcional, na intensificação dos serviços ecossistêmicos, na valorização dos conhecimentos ecológicos tradicionais e no redesenho do agroecossistema.

Entretanto, para esses mesmos autores, a consolidação desses mecanismos não ocorre de maneira instantânea. A construção de agroecossistemas resilientes demanda um processo gradual de transformação dos modelos produtivos convencionais, no qual práticas isoladas de substituição de insumos são progressivamente complementadas por estratégias de diversificação biológica, reorganização espacial das culturas e fortalecimento das interações ecológicas, reduzindo progressivamente a dependência de recursos externos e ampliando a capacidade de autorregulação do sistema.

Essa transformação representa um gradiente contínuo de complexidade ecológica, no qual a eficiência produtiva deixa de depender predominantemente de insumos industriais e passa a ser sustentada pelos processos naturais que regulam o funcionamento do agroecossistema. À medida que a diversidade funcional aumenta, ampliam-se simultaneamente a ciclagem de nutrientes, o controle biológico, a estabilidade microclimática, a conservação do solo e a resiliência frente às perturbações ambientais. Sob essa perspectiva, a transição agroecológica deve ser compreendida como um processo evolutivo de redesenho sistêmico, no qual os processos ecológicos passam progressivamente a substituir os insumos externos como principal base da produtividade agrícola. Essa evolução, sintetizada por Gliessman (2016) em níveis sucessivos de transformação dos sistemas alimentares, é representada esquematicamente na Figura 24.



Figura 24. Níveis de transição agroecológica e redesenho sistêmicos aplicados à sustentabilidade dos agroecossistemas. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A Figura 24 evidencia que a transição agroecológica constitui um processo evolutivo de reorganização funcional dos agroecossistemas, no qual a eficiência ecológica substitui progressivamente a dependência de insumos externos. Conforme sintetizado na figura, essa transformação não ocorre em uma etapa única, mas desenvolve-se gradualmente por meio de três níveis fundamentais. Nos níveis iniciais (1 e 2), o foco concentra-se no aumento da eficiência no uso dos insumos e na sua progressiva substituição por alternativas biológicas. À medida que o sistema evolui, ocorre o redesenho estrutural do agroecossistema, etapa em que os Sistemas Agroflorestais cafeeiros se consolidam como o padrão ouro da transição agroecológica. Nesse estágio, a arquitetura da paisagem passa a favorecer o funcionamento dos processos ecológicos, aumentando a eficiência no uso da energia, reduzindo a dissipação energética (entropia), intensificando a ciclagem de nutrientes e promovendo a recuperação de áreas anteriormente degradadas (Gliessman, 2016; Martins *et al.*, 2022).

Finalmente, o nível 3 expande os limites da porteira, restabelecendo o vínculo direto entre produtores e consumidores por meio de cadeias curtas e justas de comercialização, o que assegura a sustentabilidade socioeconômica

de longo prazo e a agregação de valor à atividade (Sousa *et al.*, 2025; Mendonça *et al.*, 2026).

Nesse contexto, espécies leguminosas arbóreas desempenham papel estratégico ao realizarem a fixação biológica de nitrogênio (FBN) atmosférico, ampliando a disponibilidade desse nutriente para culturas de interesse econômico, como o cafeeiro (Santos *et al.*, 2021; Silva; Souza, 2021). Paralelamente, árvores de serviço com sistemas radiculares profundos podem promover o fenômeno conhecido como levantamento hidráulico (*hydraulic lift*), pelo qual a água absorvida em camadas profundas do solo é redistribuída para horizontes superficiais durante períodos de menor transpiração (noturno).

Esse mecanismo melhora a disponibilidade hídrica para espécies vizinhas de raízes rasas, reduzindo o estresse hídrico e aumentando a estabilidade ecofisiológica do sistema em cenários de estiagem prolongada (Primavesi, 2017). Essa hidrodinâmica subterrânea funciona como uma bomba hídrica natural de facilitação ecológica, atenuando os impactos dos déficits sazonais que historicamente castigam a cafeicultura de sequeiro (Salvador *et al.*, 2025).

Conforme destaca Altieri (2001), a biodiversidade em agroecossistemas não atua somente na ocupação complementar de nichos, mas também na intensificação de processos ecológicos fundamentais capazes de substituir insumos externos e mitigar a vulnerabilidade climática da cultura principal, balizando perfeitamente as etapas evolutivas e dinâmicas do manejo agroflorestal (Salvador *et al.*, 2025). Em sistemas adequadamente planejados, a interação entre espécies vegetais, microrganismos do solo, fauna associada e processos ecológicos naturais cria mecanismos de autorregulação que aumentam a eficiência produtiva e reduzem a dependência tecnológica das propriedades rurais. Como resultado, os SAFs tornam-se capazes de conciliar produtividade, conservação ambiental, adaptação às mudanças climáticas e geração de renda, constituindo uma das mais promissoras estratégias para a construção de uma cafeicultura sustentável nos trópicos.

Os fundamentos ecológicos discutidos ao longo deste capítulo encontram expressão prática em diferentes experiências de cafeicultura agroflorestal desenvolvidas no Brasil. Entre elas, destaca-se o Sítio Relíquia do Caparaó, cuja organização produtiva demonstra como os princípios da complementariedade

funcional, da biodiversidade e da agroecologia podem ser aplicados para promover simultaneamente conservação ambiental, produção de cafés especiais e desenvolvimento territorial sustentável.

Seção 8

Estudo de caso: Sítio Relíquia do Caparaó

Os princípios de complementaridade funcional, facilitação ecológica, ciclagem de nutrientes e diversificação biológica discutida ao longo deste capítulo encontram expressão prática em diversas experiências agroflorestais desenvolvidas na cafeicultura brasileira. Entre elas, destaca-se o Sítio Relíquia do Caparaó, localizado na comunidade de Patrimônio da Penha, município de Divino de São Lourenço, Espírito Santo, que constitui um exemplo da aplicação de Sistemas Agroflorestais (SAFs) voltados à produção sustentável de cafés especiais (Figura 25).



Figura 25. Captura dos arredores do Sítio Relíquia do Caparaó. Fonte: Acervo da Cafeteria Sítio Relíquia do Caparaó, 2026.

A propriedade pertence à família dos agricultores José Isidoro Adão e Maria da Glória Alves Adão, tradicionalmente vinculada à cafeicultura regional, que optou por adotar um modelo produtivo fundamentado em princípios agroecológicos e na integração entre o cafeeiro e diferentes espécies arbóreas (Sítio Relíquia..., 2026).

A implantação do sistema agroflorestal (SAF) ocorreu como estratégia para promover maior sustentabilidade ambiental, melhoria das condições produtivas

e valorização da qualidade do café produzido. Essa iniciativa está alinhada à crescente demanda por cafés especiais cultivados em sistemas ambientalmente responsáveis, que conciliam conservação dos recursos naturais, qualidade sensorial e geração de renda para a agricultura familiar (Sítio Relíquia..., 2026).

A propriedade está inserida na região do Caparaó Capixaba, área de elevada relevância ambiental e agrícola no estado do Espírito Santo, reconhecida nacionalmente pela produção de cafés especiais de alta qualidade. Em razão das características edafoclimáticas favoráveis e da identidade territorial associada à cafeicultura, a região conquistou, em 2021, o reconhecimento de Denominação de Origem³ (DO Caparaó), o qual se consolidou como um importante mecanismo de valorização e agregação de valor aos cafés locais (DO Caparaó, 2025) (Figura 26).

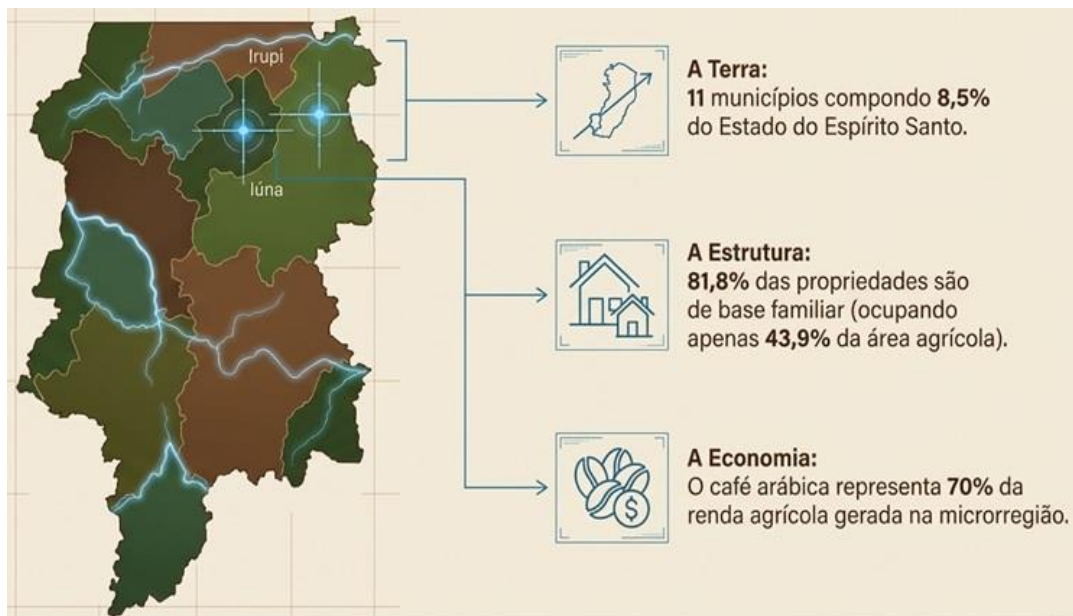


Figura 26. Delimitação territorial e abrangência da Denominação de Origem (DO) Caparaó no estado do Espírito Santo. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A inserção do Sítio Relíquia do Caparaó nesse território certificado amplia o potencial de agregação de valor à produção, uma vez que associa os atributos

³ A Denominação de Origem (DO) é uma modalidade de Indicação Geográfica (IG) que atesta que um determinado produto possui qualidades ou características que são exclusivas e essencialmente devidas ao seu meio geográfico, incluindo fatores naturais (como clima, solo, altitude) e fatores humanos (como *know-how*, tradição, técnicas de cultivo e processamento) (Vardiero *et al.*, 2024).

ambientais dos SAFs às características de qualidade, rastreabilidade e identidade territorial reconhecida pela Denominação de Origem (DO). Dessa forma, a propriedade reúne elementos que sintetizam muitos dos conceitos discutidos ao longo deste capítulo, incluindo biodiversidade funcional, conservação dos recursos naturais, produção sustentável e valorização dos serviços ecossistêmicos.

Nesse contexto, o Sítio Relíquia do Caparaó representa uma experiência relevante de transição agroecológica, evidenciando o potencial dos SAFs para integrar conservação ambiental, produção sustentável e fortalecimento socioeconômico da agricultura familiar na região do Caparaó (Sítio Relíquia..., 2026). A inserção dessa propriedade em uma região reconhecida nacionalmente pela produção de cafés especiais confere ainda maior relevância ao estudo de caso, uma vez que a qualidade do produto está diretamente associada às características ambientais, ao manejo adotado e à identidade territorial da paisagem cafeeira.

Nesse cenário, destaca-se a DO Café do Caparaó, que abrange 16 municípios localizados nos estados do Espírito Santo e Minas Gerais, no entorno do Parque Nacional do Caparaó, totalizando uma área aproximada de 4.754,63 km² (DO Caparaó, 2025). Esse reconhecimento fortalece a identidade territorial da cafeicultura regional e evidencia a singularidade dos cafés produzidos nessa área.

Segundo essa mesma fonte, os cafés da região distinguem-se pelas condições edafoclimáticas específicas, caracterizadas por altitudes entre 800 e 1.400 metros, clima ameno, relevo montanhoso e solos favoráveis ao desenvolvimento de cafés especiais. Esses fatores naturais, associados ao conhecimento tradicional das famílias produtoras, contribuem para a formação de um *terroir* diferenciado, responsável pelas características sensoriais marcantes e pela elevada qualidade da bebida.

A DO constitui um instrumento de certificação que reconhece oficialmente produtos cujas qualidades e reputação estão diretamente associadas ao território de produção. No caso do Café do Caparaó, esse reconhecimento valoriza não apenas os atributos físicos e sensoriais dos grãos, mas também os aspectos históricos, culturais e sociais relacionados à tradição cafeeira da região.

Dessa forma, a DO fortalece a valorização territorial, amplia a competitividade do produto e agrega valor econômico à produção regional (DO Caparaó, 2025).

Além da relevância econômica da cafeicultura, a região do Caparaó tem se destacado pela implantação de iniciativas voltadas à sustentabilidade e à conservação ambiental. Entre essas ações, destaca-se o Programa Reflorestar, política pública desenvolvida pelo Governo do Estado do Espírito Santo com o objetivo de incentivar práticas sustentáveis de uso e manejo do solo, associadas à restauração ecológica produtiva (Sítio Relíquia..., 2026).

O Programa Reflorestar busca promover a recuperação da cobertura florestal e a restauração do ciclo hidrológico por meio da preservação e recomposição ambiental das propriedades rurais. Paralelamente, a iniciativa incentiva a geração de renda no meio rural, estimulando os produtores a adotarem arranjos produtivos sustentáveis, como os SAF e os Sistemas Silvopastoris (SSPs). Dessa forma, concilia-se a conservação dos recursos hídricos e do solo com a produção agrícola de alto valor agregado e a manutenção dos serviços ecossistêmicos essenciais à resiliência climática da região (Silva *et al.*, 2022; Vieira *et al.*, 2024; Programa Reflorestar, 2025; Rodrigues; Souza, 2025) (Figura 27).



Figura 27. Programa Reflorestar como indutor da transição agroecológica e da expansão dos Sistemas Agroflorestais na cafeicultura capixaba. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Ao atuar como um mecanismo indutor, o programa viabiliza o suporte financeiro e técnico necessário para que o agricultor familiar deixe de ser apenas um produtor de *commodities* e passe a ser reconhecido também como um provedor de serviços ambientais. Esse arranjo reduz o risco econômico inicial da transição agroecológica, permitindo que propriedades como o Sítio Relíquia do Caparaó convertam áreas degradadas ou pastagens subutilizadas em sistemas biodiversos e produtivos. Para compreender a viabilidade de replicação desse modelo, faz-se necessário analisar os critérios de elegibilidade que norteiam o acesso a essa política pública (Trugilho *et al.*, 2022; Programa Reflorestar, 2025).

Ao atuar como um mecanismo indutor da restauração produtiva, o Programa Reflorestar viabiliza o suporte financeiro e técnico necessário para que o agricultor familiar deixe de ser apenas um produtor de *commodities* e passe a ser reconhecido também como um provedor de serviços ambientais. Esse arranjo reduz parte dos riscos econômicos associados à transição agroecológica, permitindo que propriedades como o Sítio Relíquia do Caparaó convertam áreas degradadas ou pastagens subutilizadas em sistemas biodiversos e produtivos (Miccolis *et al.*, 2016; Trugilho *et al.*, 2022; Programa Reflorestar, 2025).

A experiência demonstra que a articulação entre políticas públicas, conservação ambiental e produção agrícola pode gerar benefícios simultâneos para os produtores e para a sociedade, favorecendo a recuperação dos serviços ecossistêmicos, a diversificação produtiva e o fortalecimento da agricultura familiar. Nesse contexto, torna-se relevante compreender os mecanismos operacionais do Programa Reflorestar, especialmente os critérios de elegibilidade e as modalidades de apoio disponibilizadas aos agricultores interessados em aderir à iniciativa (Miccolis *et al.*, 2016; Egidio; Souza, 2025; Programa Reflorestar, 2025).

8.1. Quem pode participar do Programa Reflorestar?

O Programa Reflorestar é direcionado aos proprietários e posseiros rurais do estado do Espírito Santo que possuam interesse em adotar práticas de

conservação ambiental e uso sustentável dos recursos naturais em suas propriedades. O público-alvo engloba diferentes perfis de agricultores, com atenção especial aos pequenos produtores e às unidades de agricultura familiar, que desempenham um papel relevante na governança ambiental, na conservação da biodiversidade e na consolidação de sistemas agrícolas sustentáveis (Silva *et al.*, 2022; Trugilho *et al.*, 2022; Vieira *et al.*, 2024; Programa Reflorestar, 2025; Rodrigues; Souza, 2025).

Como critério fundamental de elegibilidade e regularidade jurídica, é obrigatório que a propriedade esteja devidamente inscrita no Cadastro Ambiental Rural (CAR). Esse instrumento serve como a base técnica indispensável para o planejamento das intervenções ecológicas e para a validação das áreas passíveis de receber os incentivos. Ademais, o Reflorestar atua em estreita sinergia com o Programa de Regularização Ambiental (PRA), funcionando como um mecanismo de fomento econômico e técnico para a execução de Projetos de Recomposição de Áreas Degradadas e Alteradas (PRADA/PRAD) (Silva *et al.*, 2022; Trugilho *et al.*, 2022; Programa Reflorestar, 2025).

Dessa forma, podem participar produtores que já desenvolvem ações de conservação, bem como aqueles interessados em implantar práticas sustentáveis de manejo do solo, recuperação de pastagens degradadas, recomposição florestal e implantação de SAFs. Além de auxiliar na adequação ambiental do imóvel frente ao Código Florestal, o programa incentiva a integração entre produção e conservação por meio de mecanismos de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), reconhecendo economicamente os produtores que contribuem para a recuperação da vegetação nativa e manutenção dos recursos hídricos (Trugilho *et al.*, 2022; Vieira *et al.*, 2024; Programa Reflorestar, 2025).

Outro diferencial estratégico do programa para atrair a agricultura familiar reside na garantia jurídica e técnica quanto às informações de corte de madeira futura. Ao implantar SAFs ou SSPs pelo Reflorestar, assegura-se ao produtor o direito de exploração econômica dos recursos florestais plantados, tanto de espécies exóticas quanto de nativas em áreas de uso alternativo do solo, desde que conduzidos por meio de manejos sustentáveis e colheitas seletivas (desbastes). Esse encadeamento de etapas e benefícios técnico-jurídicos

consolida uma trilha clara para a regularização e o desenvolvimento econômico da propriedade (Silva *et al.*, 2022; Trugilho *et al.*, 2022; Programa Reflorestar, 2025; Rodrigues; Souza, 2025).

A operacionalização do Programa Reflorestar fundamenta-se na integração entre instrumentos de regularização ambiental, incentivos econômicos e estratégias de produção sustentável. Mais do que um programa de recuperação florestal, a iniciativa estabelece uma trajetória estruturada que conecta o diagnóstico ambiental da propriedade, a adequação à legislação vigente e a implantação de sistemas produtivos compatíveis com os princípios da sustentabilidade. Essa articulação permite que os produtores rurais avancem gradualmente da regularização ambiental para modelos de uso da terra capazes de gerar renda, conservar recursos naturais e ampliar a oferta de serviços ecossistêmicos (Trugilho *et al.*, 2022; Programa Reflorestar, 2025) (Figura 28).

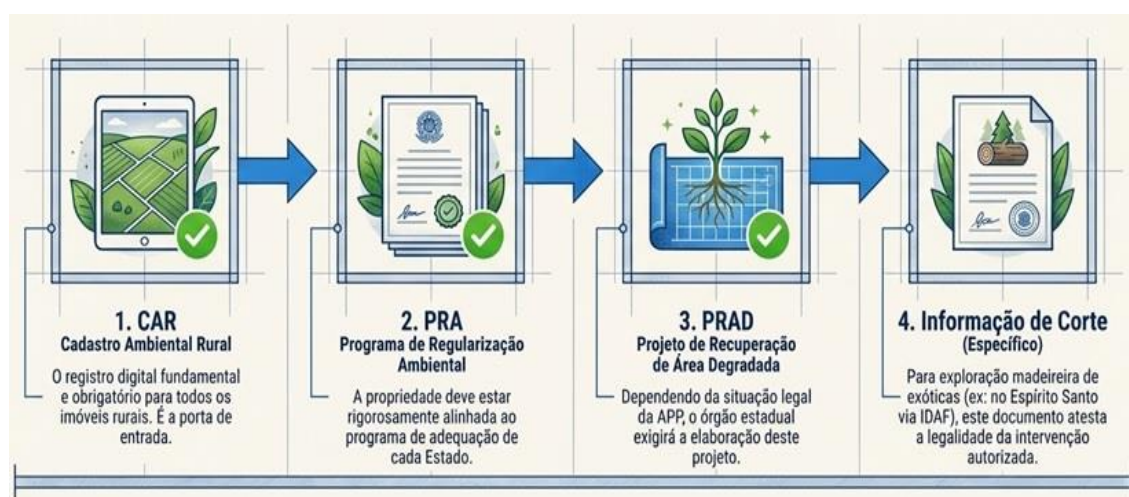


Figura 28. Fluxo de integração técnico-jurídica do Programa Reflorestar: do cadastro ambiental ao manejo produtivo sustentável. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A articulação sequencial apresentada na dinâmica do programa demonstra que a transição agroecológica não se restringe a uma obrigação legal onerosa, mas se converte em uma oportunidade de qualificação do território rururbano⁴.

⁴ Conceito da geografia e da sociologia que descreve aquele espaço, território ou estilo de vida que mistura características rurais e urbanas. É a famosa “zona de transição”, onde você encontra atividades agrícolas convivendo paralelas com indústrias, condomínios fechados ou comércio tipicamente da cidade.

Ao alinhar o diagnóstico do CAR, o planejamento do PRAD, o subsídio do PSA e a perspectiva de colheita madeireira futura, o Programa Reflorestar mitiga os riscos econômicos iniciais da conversão de sistemas convencionais para agroflorestais. Esse arranjo confere a segurança jurídica e a viabilidade financeira necessárias para que os agricultores familiares da região do Caparaó se consolidem como guardiões dos serviços ecossistêmicos locais (Miccolis *et al.*, 2016; Vieira *et al.*, 2024; Programa Reflorestar, 2025; Mendonça *et al.*, 2026).

Há de se considerar que os SAFs desempenham papel multifuncional no fortalecimento da sustentabilidade em territórios rururbanos, atuando como elementos integradores entre a produção agrícola regenerativa, a conservação dos recursos naturais e o fortalecimento dos circuitos curtos de comercialização. Essa configuração favorece a diversificação das fontes de renda, amplia a oferta de alimentos produzidos sob bases ecológicas e fortalece as relações socioeconômicas entre o campo e a cidade, contribuindo para o desenvolvimento territorial sustentável e para a valorização da agricultura familiar (Caporal; Costabeber, 2004; Sachs, 2008; Pronti; Coccia, 2020; Souza, 2026a).

Ao mitigar os impactos da fragmentação da paisagem típica das franjas urbanas, o modelo agroflorestal fortalece uma governança territorial mais resiliente, na qual a conservação ambiental deixa de representar uma restrição ao uso da terra e passa a constituir um vetor de desenvolvimento socioeconômico. Essa integração entre instrumentos normativos, incentivos econômicos e processos ecológicos favorece simultaneamente a restauração da paisagem, a provisão de serviços ecossistêmicos e a consolidação de sistemas produtivos mais sustentáveis, resilientes e competitivos (Miccolis *et al.*, 2016; Altieri; Nicholls, 2020; Egidio; Souza, 2025; Programa Reflorestar, 2025).

8.2. Quais os benefícios do Programa Reflorestar?

Os participantes do Programa Reflorestar têm acesso a diferentes incentivos voltados à conservação ambiental e à promoção do uso sustentável do solo. Entre os principais benefícios oferecidos, destaca-se o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), um mecanismo de incentivo econômico destinado

aos produtores rurais que preservam ou recuperam áreas de vegetação nativa em suas propriedades. Esse arranjo financeiro opera por meio de um ciclo virtuoso e contínuo, que transforma o manejo ecológico em ativos econômicos e sociais para a comunidade rural (Programa Reflorestar, 2025; Rodrigues; Souza, 2025) (Figura 29).



Figura 29. Ciclo de incentivos do Programa Reflorestar: integração entre Pagamento por Serviços Ambientais, restauração ecológica e desenvolvimento rural sustentável. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Conforme sintetizado na Figura 29, o Programa Reflorestar estrutura-se como um ciclo integrado de incentivos capaz de articular conservação ambiental, restauração ecológica e desenvolvimento rural sustentável. Nesse modelo, instrumentos econômicos, mecanismos de regularização ambiental e práticas de restauração produtiva atuam de forma complementar, criando condições para que a proteção dos recursos naturais seja incorporada como parte da estratégia produtiva das propriedades rurais.

O funcionamento desse ciclo baseia-se em um modelo de reconhecimento pelos serviços ecossistêmicos prestados pelos produtores, especialmente aqueles relacionados à conservação dos recursos hídricos, à proteção da biodiversidade, ao sequestro de carbono e à recuperação ambiental de áreas degradadas. Dessa maneira, a política pública valoriza economicamente as

práticas sustentáveis que contribuem para a manutenção do equilíbrio ecológico e para a melhoria da qualidade ambiental regional (Trugilho *et al.*, 2022; Vieira *et al.*, 2024; Programa Reflorestar, 2025; Rodrigues; Souza, 2025).

Além do incentivo financeiro direto associado aos serviços ambientais (PSA), o Programa Reflorestar oferece apoio econômico fundamental para as fases iniciais de implantação e manutenção de áreas em processo de restauração ecológica. Esse suporte financeiro mitiga o custo de capital inicial do produtor, incluindo recursos destinados à aquisição de mudas florestais nativas e frutíferas, materiais para cercamento (palanques e arames), adubos, corretivos de solo e demais insumos agrícolas necessários à implantação de sistemas sustentáveis de produção (Vieira *et al.*, 2024; Programa Reflorestar, 2025; Rodrigues; Souza, 2025; Mendonça *et al.*, 2026).

Outro benefício fundamental refere-se ao estímulo à adoção de SAFs e outras práticas conservacionistas. Nos SAFs cafeeiros, por exemplo, esses incentivos impulsionam a diversificação produtiva, o incremento da matéria orgânica, a melhoria da fertilidade e da estrutura do solo, a proteção dos recursos hídricos e o aumento da resiliência climática das propriedades rurais. Dessa forma, o Programa Reflorestar fortalece a sinergia entre conservação ambiental e desenvolvimento rural sustentável, promovendo benefícios econômicos, sociais e ecológicos integrados para os produtores rurais e para a sociedade como um todo (Trugilho *et al.*, 2022; Vieira *et al.*, 2024; Programa Reflorestar, 2025; Rodrigues; Souza, 2025).

Os benefícios proporcionados pelo Programa Reflorestar transcendem a dimensão financeira e alcançam aspectos estruturais relacionados à sustentabilidade dos agroecossistemas. Ao estimular a recuperação ambiental associada à produção agrícola, o programa cria condições favoráveis para a implantação de modelos produtivos mais resilientes, diversificados e compatíveis com os princípios da agroecologia. Dessa forma, os incentivos econômicos deixam de representar apenas mecanismos de compensação ambiental e passam a atuar como instrumentos estratégicos de indução da transição agroecológica, fortalecendo simultaneamente a conservação dos recursos naturais, a restauração da paisagem e a sustentabilidade da agricultura familiar (Miccolis *et al.*, 2016; Altieri; Nicholls, 2020; Programa Reflorestar, 2025).

Nesse contexto, as propriedades inseridas no programa passam a constituir importantes espaços de inovação socioambiental, nos quais políticas públicas, assistência técnica, conservação ambiental e geração de renda convergem para a construção de sistemas agrícolas multifuncionais. O Sítio Relíquia do Caparaó representa uma dessas experiências, permitindo compreender, em escala de propriedade rural, como a articulação entre instrumentos de apoio à restauração produtiva e princípios agroecológicos pode contribuir para a consolidação de Sistemas Agroflorestais voltados à produção de cafés especiais, à conservação da biodiversidade e ao fortalecimento do desenvolvimento territorial sustentável (Vieira *et al.*, 2024; Egidio; Souza, 2025; Mendonça *et al.*, 2026).

8.3. Caracterização da propriedade

O estudo de caso foi realizado no Sítio Relíquia do Caparaó, localizado na comunidade de Patrimônio da Penha, no município de Divino de São Lourenço, região do Caparaó Capixaba, estado do Espírito Santo. A propriedade possui área total de aproximadamente 15 hectares, dos quais 1 hectare é destinado ao cultivo de café em Sistema Agroflorestal (SAF) (Sítio Relíquia... , 2025).

A área agroflorestal foi implantada em 30 de novembro de 2023, com o objetivo de integrar a produção de café a práticas sustentáveis de manejo e conservação ambiental. A propriedade encontra-se situada a uma altitude média de 1.000 metros, condição que favorece o cultivo de cafés especiais em razão das características climáticas típicas das regiões montanhosas do Caparaó. A implantação e o acompanhamento técnico do sistema contam com apoio do Programa Reflorestar, em parceria com a empresa MV Gestão Integrada, que atuam no incentivo à adoção de práticas sustentáveis de uso do solo, recuperação ambiental e fortalecimento da produção agroecológica na região (*ibidem*).

Além das condições ambientais favoráveis, o Sítio Relíquia do Caparaó destaca-se pela adoção de um modelo de manejo baseado nos princípios da agroecologia e da restauração produtiva. O planejamento do SAF priorizou a diversificação de espécies, a cobertura permanente do solo, a recuperação da

fertilidade natural e a ampliação da biodiversidade funcional, buscando conciliar a produção de cafés especiais com a conservação dos recursos naturais. Essa abordagem transforma a propriedade em uma unidade demonstrativa da aplicação prática dos conceitos discutidos ao longo deste capítulo, evidenciando como a integração entre conhecimento técnico, políticas públicas e processos ecológicos pode favorecer a construção de agroecossistemas mais resilientes e sustentáveis (Altieri, 2012; Gliessman, 2009; Mendonça *et al.*, 2026). Os principais aspectos de caracterização da propriedade encontram-se sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização geral do Sítio Relíquia do Caparaó

Variável	Caracterização
Nome da propriedade	Sítio Relíquia do Caparaó
Município	Divino de São Lourenço – ES
Comunidade	Patrimônio da Penha
Área total da propriedade	15 ha
Área destinada ao SAF com café	1 ha
Altitude média	1.000 m
Data de implantação do SAF	30 de novembro de 2023
Sistema produtivo	Sistema Agroflorestal (SAF) com café
Instituições de apoio	Programa Reflorestar e MV Gestão Integrada

Fonte: Adaptado de Sítio Relíquia do Caparaó, 2025.

As características edafoclimáticas da propriedade, associadas ao suporte técnico do Programa Reflorestar e à inserção territorial na região da DO Caparaó, constituem elementos fundamentais para a compreensão da lógica de implantação do SAF adotado. Nesse contexto, torna-se necessário analisar a

composição e a organização espacial das espécies utilizadas, bem como os princípios ecológicos que orientam o desenho do SAF implantado no Sítio Relíquia do Caparaó.

8.4. Desenho do sistema agroflorestal

O SAF implantado no Sítio Relíquia do Caparaó foi planejado com base nos princípios da sucessão ecológica e da diversificação funcional das espécies, buscando conciliar a restauração ambiental com a viabilidade produtiva da propriedade. O arranjo agroflorestal foi estruturado de forma a reproduzir processos naturais observados em ecossistemas florestais, promovendo maior equilíbrio ecológico, conservação do solo e sustentabilidade da produção cafeeira (Programa Reflorestar, 2025; Sítio Relíquia... , 2025).

A organização do sistema considera diferentes estratos vegetais e ciclos de desenvolvimento das espécies, permitindo melhor aproveitamento da luz solar, maior cobertura do solo e intensificação da ciclagem de nutrientes. Nesse contexto, o cafeeiro ocupa o estrato intermediário do sistema, beneficiando-se do sombreamento parcial proporcionado pelas espécies arbóreas e frutíferas.

Entre as espécies utilizadas no SAF destacam-se o café arábica (*Coffea arabica*), como cultura principal, além de espécies arbóreas nativas e frutíferas, como ipê-amarelo (*Handroanthus albus*), ingá (*Inga spp.*), cedro (*Cedrela fissilis*), bananeira (*Musa spp.*), abacateiro (*Persea americana*), goiabeira (*Psidium guajava*) e jaqueira (*Artocarpus heterophyllus*). Também foram inseridas espécies de adubação verde, como a crotalária (*Crotalaria spp.*), utilizadas para proteção do solo, fixação biológica de nitrogênio e produção de biomassa (Sítio Relíquia..., 2025).

A diversidade de espécies presentes no sistema favorece a formação de diferentes estratos vegetais, contribuindo para a estabilidade ecológica, o controle natural de pragas, a manutenção da umidade do solo e a melhoria das condições microclimáticas da lavoura cafeeira. Além disso, a combinação entre espécies de ciclos curtos, médios e longos permite diversificação produtiva e geração de renda em diferentes períodos (ibidem).

A configuração multiestratificada observada no Sítio Relíquia do Caparaó não resulta de uma disposição aleatória das espécies, mas de um processo de planejamento técnico orientado pelos princípios da restauração produtiva e da sucessão ecológica. A definição das espécies, dos espaçamentos, dos arranjos de plantio e das estratégias de manejo foi conduzida de forma a compatibilizar os objetivos ambientais do Programa Reflorestar com as necessidades produtivas da propriedade. Nesse sentido, a compreensão do desenho agroflorestal exige também a análise dos procedimentos metodológicos adotados para sua implantação e acompanhamento técnico.

8.5. Delineamento para implantação do Programa Reflorestar

A implantação do SAF no Sítio Relíquia do Caparaó foi realizada com base em princípios de manejo ecológico e organização espacial das espécies, visando favorecer tanto o desenvolvimento do cafeeiro quanto a funcionalidade ambiental do sistema (Sítio Relíquia..., 2025).

O cultivo do café foi implantado em espaçamento de 3,0 metros entrelinhas e 1,0 metro entre plantas, configuração que possibilita adequado desenvolvimento vegetativo, circulação de ar e realização das práticas de manejo. Esse arranjo também favorece a inserção de espécies arbóreas e frutíferas no sistema agroflorestal, promovendo maior diversificação estrutural e produtiva (*ibidem*).

As espécies sombreadoras foram distribuídas de forma intercalada entre as linhas de café, considerando aspectos como crescimento, arquitetura das copas e função ecológica de cada espécie. Esse planejamento busca proporcionar equilíbrio na incidência de luz solar sobre os cafeeiros, evitando tanto o excesso de sombreamento quanto a exposição direta e intensa à radiação solar (*ibidem*).

O manejo das espécies arbóreas inclui a realização periódica de podas programadas, prática fundamental para o controle do sombreamento e para a manutenção do equilíbrio microclimático do sistema. As podas também contribuem para a produção de biomassa vegetal, utilizada como cobertura

morta sobre o solo, favorecendo a ciclagem de nutrientes, a conservação da umidade e a proteção contra processos erosivos (ibidem).

Além desses benefícios, o manejo contínuo da vegetação favorece a renovação dos processos ecológicos responsáveis pelo funcionamento do agroecossistema. A deposição permanente de resíduos vegetais intensifica a atividade da microbiota do solo, estimula a macro e a mesofauna edáfica, melhora a estrutura física do solo e amplia a disponibilidade gradual de nutrientes para os cafeeiros. Como consequência, fortalece-se a capacidade de autorregulação do sistema, reduzindo progressivamente a dependência de insumos externos e aumentando a eficiência no aproveitamento dos recursos naturais disponíveis (Nair, 1993; Gliessman, 2009; Altieri, 2012).

Essa organização do sistema contribui para fortalecer a diversificação produtiva e a resiliência da propriedade frente às oscilações climáticas e econômicas. Dessa forma, o arranjo agroflorestal implantado no Sítio Relíquia do Caparaó constitui uma aplicação prática dos princípios discutidos ao longo deste capítulo, permitindo avaliar, em escala local, os efeitos da integração entre restauração ambiental e produção agrícola sustentável.

Mais do que um modelo de produção, a experiência desenvolvida na propriedade demonstra que a adoção de SAFs pode conciliar elevada qualidade dos cafés produzidos, conservação da biodiversidade, recuperação dos recursos naturais e fortalecimento da agricultura familiar, constituindo um exemplo representativo da transição agroecológica na região do Caparaó. Os principais resultados decorrentes dessa experiência são apresentados a seguir.

8.6. Resultados obtidos com o Programa Reflorestar

Os resultados observados no primeiro ano de implantação do SAF no Sítio Relíquia do Caparaó demonstraram efeitos positivos e promissores sobre o desenvolvimento da lavoura cafeeira. Esses impactos benéficos são especialmente relevantes quando contrastados com o cenário de degradação original da área, mesmo considerando que o arranjo agroflorestal ainda se encontra em fase inicial de transição e consolidação ecológica (Sítio Relíquia... , 2025).

Antes da implantação do SAF, a área apresentava condições típicas de degradação observadas em muitas propriedades de relevo montanhoso da região. O uso anterior da terra, associado à elevada declividade do terreno e à baixa cobertura vegetal permanente, favorecia processos erosivos, reduzindo a capacidade de retenção de água e comprometendo a qualidade ambiental da paisagem. O diagnóstico inicial realizado na propriedade permitiu identificar essas limitações e subsidiou o planejamento das ações de restauração produtiva implantadas posteriormente.

A avaliação das condições iniciais evidenciou que a recuperação da área dependeria não apenas da implantação do cafeeiro, mas da reconstrução gradual dos processos ecológicos responsáveis pela conservação do solo, pela ciclagem de nutrientes e pela regulação do microclima. Nesse contexto, a adoção do SAF foi concebida como uma estratégia de restauração produtiva, capaz de integrar a recuperação ambiental à produção de cafés especiais. As principais características da área antes da implantação do SAF são apresentadas na Figura 30, que ilustra o cenário inicial que motivou a adoção das práticas agroecológicas.



Figura 30. Situação da área antes da implantação do SAF pelo Programa Reflorestar, evidenciando degradação da cobertura vegetal e risco de processos erosivos em ambiente de encosta. Fonte: Acervo MV Gestão Integrada, 2022.

Entre os principais resultados biométricos e fitossanitários verificados na lavoura implantada destacam-se a excelente formação e o enchimento dos grãos de café, o maior vigor vegetativo das plantas, evidenciado pela coloração intensa e expansão foliar, e a redução expressiva da incidência de pragas e doenças na área cultivada (Sítio Relíquia..., 2025). Embora esses resultados correspondam ao primeiro ano de implantação do sistema, eles indicam uma resposta inicial positiva à reorganização ecológica promovida pelo SAF, corroborando observações registradas em outros sistemas cafeeiros biodiversos (Mokondoko *et al.*, 2022; Yang; Xiong; Xiao, 2024).

Esses indicadores favoráveis estão diretamente associados às melhorias microambientais proporcionadas pelo componente arbóreo e pelo manejo conservacionista. Em terrenos de encosta sinuosa e forte declividade, a estratificação da vegetação e o sombreamento moderado reduzem a incidência direta da radiação solar, atenuam as amplitudes térmicas, diminuem a evapotranspiração e favorecem maior disponibilidade hídrica para os cafeeiros, criando condições mais estáveis para o crescimento vegetativo e o desenvolvimento reprodutivo da cultura (Nair, 1993; Lin, 2007; Mokondoko *et al.*, 2022; Souza; Simão, 2024).

Paralelamente, a manutenção da cobertura vegetal permanente e o aporte contínuo de biomassa sobre o solo intensificam a ciclagem de nutrientes, aumentam os teores de matéria orgânica e favorecem a atividade da microbiota, da macrofauna e da mesofauna edáfica, promovendo melhorias nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Esses processos ampliam a infiltração e a retenção de água, aumentam a estabilidade estrutural e fortalecem a capacidade do agroecossistema de suportar períodos de déficit hídrico (Lal, 2020; Martins *et al.*, 2022; Sá *et al.*, 2025).

Sob a perspectiva fitossanitária, a menor pressão de pragas e doenças observada na área está relacionada ao aumento da biodiversidade funcional, que amplia a abundância de predadores, parasitoides e outros inimigos naturais, favorecendo mecanismos de controle biológico e de autorregulação ecológica. Dessa forma, a diversidade vegetal deixa de representar apenas um componente estrutural da paisagem e passa a exercer papel estratégico na

manutenção da estabilidade ecológica e produtiva dos Sistemas Agroflorestais (Altieri, 2001; Gurr; Wratten; Snyder, 2012; Yang; Xiong; Xiao, 2024).

Embora os resultados ainda correspondam à fase inicial de transição agroecológica, o arranjo implantado demonstra elevado potencial para ampliar progressivamente os benefícios produtivos, ambientais e econômicos do sistema. À medida que aumenta a complexidade estrutural da vegetação e se consolidam os processos ecológicos de ciclagem de nutrientes, formação de matéria orgânica, regulação microclimática e controle biológico, espera-se um incremento contínuo da resiliência do agroecossistema e da estabilidade produtiva da cafeicultura, conforme ilustrado na Figura 31 (Gliessman, 2009; Altieri; Nicholls, 2020; Yang; Xiong; Xiao, 2024).



Figura 31. Situação da área após 18 meses de implantação do SAF pelo Programa Reflorestar, evidenciando recuperação ambiental, manutenção da cobertura vegetal e desenvolvimento vigoroso dos cafeeiros consorciados com bananeiras. Fonte: Acervo José Elias Alves Adão, 2025.

Esse cenário fica evidente ao observar a rápida recuperação da paisagem, onde o cafezal já se desenvolve em excelente estado vegetativo, integrado ao manejo conservacionista de plantas espontâneas nas entrelinhas e ao estrato semiperene de bananeiras, reforçando a viabilidade dos SAFs como estratégia

sustentável e resiliente para a cafeicultura na região do Caparaó (Souza; Simão, 2024; Sítio Relíquia... , 2025).

A evolução temporal observada entre o diagnóstico pretérito da área e o estabelecimento do sistema aos dezoito meses corrobora a eficiência dos SAFs em acelerar a dinâmica de sucessão ecológica e de recuperação edáfica. O consórcio entre os cafeeiros, as musáceas e o estrato arbóreo em desenvolvimento não apenas aperfeiçoou o uso dos recursos naturais, maximizando a captação de radiação solar filtrada e a retenção de umidade na rizosfera, mas também restabeleceu fluxos energéticos mais estáveis no agroecossistema (Trugilho *et al.*, 2022; Vieira *et al.*, 2024; Rodrigues; Souza, 2025).

Os resultados observados no Sítio Relíquia do Caparaó evidenciam que a integração entre políticas públicas de incentivo, restauração ecológica e produção agroflorestal pode gerar benefícios simultâneos para a conservação ambiental e para a agricultura familiar. Essa experiência reforça o potencial dos SAFs como estratégia de desenvolvimento rural sustentável e constitui uma importante referência para a expansão de iniciativas semelhantes em outras áreas da região do Caparaó.

Embora os resultados qualitativos observados durante os primeiros dezoito meses de implantação já evidenciem avanços significativos na recuperação ambiental e no desenvolvimento da lavoura cafeeira, a avaliação da sustentabilidade de SAFs requer uma abordagem mais abrangente, baseada em indicadores capazes de mensurar seus efeitos sobre os componentes ecológicos, econômicos e sociais do sistema produtivo. Assim, nas seções seguintes são apresentados os principais indicadores utilizados para avaliar o desempenho do SAF no Sítio Relíquia do Caparaó.

8.7. Indicadores ambientais

A avaliação da sustentabilidade de SAFs deve transcender a análise exclusiva da produtividade agrícola, incorporando indicadores capazes de mensurar os efeitos do manejo sobre a qualidade ambiental dos agroecossistemas. No presente estudo, parte desses indicadores já pôde ser

observada qualitativamente durante os primeiros dezoito meses de implantação do SAF no Sítio Relíquia do Caparaó, enquanto outros são apresentados como parâmetros técnicos recomendados para o monitoramento de médio e longo prazo da evolução ecológica do sistema. Sob essa perspectiva, indicadores relacionados à biodiversidade, à conservação do solo, à dinâmica da água, ao sequestro de carbono e à fauna associada constituem importantes ferramentas para avaliar a eficiência ecológica dos SAFs e sua contribuição para a restauração funcional da paisagem (Altieri; Nicholls, 2004; Jose, 2009; Gliessman, 2015; FAO, 2021).

No Sítio Relíquia do Caparaó, embora o SAF ainda se encontre em fase inicial de desenvolvimento, as observações realizadas durante os primeiros dezoito meses de implantação já evidenciam alterações positivas na estrutura e no funcionamento do agroecossistema. A substituição de uma área anteriormente degradada por um arranjo multiestratificado promoveu melhorias na cobertura vegetal, na proteção do solo, nas condições microclimáticas e na diversidade biológica. Esses resultados preliminares indicam o restabelecimento gradual de processos ecológicos essenciais e constituem uma base importante para o acompanhamento dos indicadores ambientais ao longo da consolidação do sistema.

Diferentemente dos sistemas agrícolas convencionais, nos quais a avaliação costuma se concentrar em indicadores exclusivamente produtivos, os SAFs demandam uma abordagem multidimensional capaz de integrar atributos físicos, químicos, biológicos, ecológicos e socioeconômicos. Essa visão sistêmica permite compreender que o desempenho do sistema não depende apenas da produção de café, mas também da capacidade de conservar recursos naturais, ampliar a oferta de serviços ecossistêmicos e aumentar a resiliência frente às mudanças climáticas (Jose, 2009; Perfecto; Vandermeer, 2010).

A avaliação integrada desses atributos permite compreender a evolução funcional do agroecossistema durante o processo de transição agroecológica. O conjunto de indicadores ambientais selecionados contempla os principais processos ecológicos relacionados à conservação do solo, à dinâmica da água, à biodiversidade, à ciclagem de nutrientes, à regulação microclimática e ao funcionamento ecológico do sistema, fornecendo uma base para o

monitoramento contínuo da sustentabilidade do SAF implantado no Sítio Relíquia do Caparaó.

Embora parte desses indicadores já apresente evidências qualitativas decorrentes das observações realizadas durante os primeiros dezoito meses de implantação do sistema, outros deverão ser monitorados continuamente ao longo da evolução do SAF, permitindo avaliar a consolidação dos processos ecológicos e a sustentabilidade ambiental da propriedade em diferentes estágios de desenvolvimento. Essa abordagem possibilita acompanhar não apenas as respostas imediatas do sistema, mas também sua trajetória de recuperação ecológica e aumento da resiliência ao longo do tempo. Os principais indicadores ambientais considerados nessa avaliação são sintetizados na Figura 32.



Figura 32. Principais indicadores ambientais utilizados na avaliação do Sistema Agroflorestal implantado no Sítio Relíquia do Caparaó. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), observações de campo (2024-2025), com auxílio de IA (ChatGPT).

Conforme sintetizado na Figura 32, a implantação do SAF desencadeia um conjunto de processos ecológicos interdependentes que atuam simultaneamente na recuperação ambiental e no fortalecimento da sustentabilidade do agroecossistema. A evolução desses indicadores permite acompanhar não

apenas as melhorias na qualidade ambiental da propriedade, mas também o grau de consolidação dos processos ecológicos responsáveis pela estabilidade e pela resiliência do sistema ao longo do tempo.

Embora parte desses parâmetros ainda demande monitoramento continuado, as observações iniciais já evidenciam tendências positivas compatíveis com a literatura sobre Sistemas Agroflorestais. Nos itens subsequentes, cada um desses indicadores é analisado individualmente, discutindo-se sua contribuição para o desempenho ecológico e produtivo do SAF implantado no Sítio Relíquia do Caparaó.

8.7.1. Biodiversidade e diversidade funcional

Entre os diferentes indicadores ambientais utilizados para avaliar a sustentabilidade de SAFs, a biodiversidade ocupa posição central, por constituir a base sobre a qual se organizam os processos ecológicos responsáveis pelo funcionamento, pela estabilidade e pela resiliência dos agroecossistemas. A presença de elevada diversidade biológica influencia diretamente a ciclagem de nutrientes, o controle biológico, a polinização, a conservação do solo, a dinâmica da água e a provisão de diversos serviços ecossistêmicos, tornando-se um dos principais parâmetros para avaliar a evolução da restauração ecológica em sistemas produtivos (Jose, 2009; Loreau, 2010; Tilman; Isbell; Cowles, 2014; Altieri; Nicholls, 2020).

A biodiversidade constitui um dos principais indicadores de qualidade ambiental em SAFs, uma vez que está diretamente relacionada à estabilidade ecológica, ao funcionamento dos processos ecossistêmicos e à capacidade de resiliência do sistema produtivo frente às perturbações naturais e antrópicas. Diferentemente dos monocultivos, nos quais predominam poucas espécies vegetais e reduzida diversidade biológica, os SAFs promovem a coexistência de diferentes componentes arbóreos, arbustivos, herbáceos e microbiológicos, ampliando significativamente a complexidade estrutural do agroecossistema (Altieri; Nicholls, 2004; Jose, 2009; Gliessman, 2015).

No Sítio Relíquia do Caparaó, a implantação do SAF promoveu uma expressiva diversificação da paisagem agrícola ao integrar o cafeeiro com

espécies florestais nativas, frutíferas e plantas de adubação verde. Essa composição multiestratificada ampliou a heterogeneidade ambiental da área, favorecendo a ocupação de diferentes nichos ecológicos e estabelecendo condições mais favoráveis para o desenvolvimento de organismos benéficos, como polinizadores, inimigos naturais de pragas e decompositores.

Sob a perspectiva da Ecologia de Ecossistemas e da biodiversidade funcional, apresenta importância ainda maior que a simples riqueza de espécies. Cada componente vegetal desempenha funções ecológicas específicas, como fixação biológica de nitrogênio, ciclagem de nutrientes, produção de biomassa, oferta de néctar e pólen, proteção do solo, sombreamento, interceptação das chuvas e armazenamento de carbono. A complementariedade dessas funções aumenta a eficiência na utilização dos recursos naturais e reduz a competição direta entre as espécies, tornando o sistema mais estável e produtivo (Loreau, 2010; Tilman; Isbell; Cowles, 2014).

No caso do Sítio Relíquia do Caparaó, observa-se que espécies como ingá (*Inga* spp.) e crotalária (*Crotalaria* spp.) contribuem para a fixação biológica de nitrogênio e para o enriquecimento do solo com matéria orgânica. As bananeiras (*Musa* spp.) proporcionam sombreamento temporário, redução da velocidade dos ventos e produção de biomassa, enquanto árvores como ipê-amarelo (*Handroanthus albus*) e cedro (*Cedrela fissilis*) incrementam a estratificação vertical da vegetação e ampliam o potencial de sequestro de carbono. Paralelamente, espécies frutíferas, como abacateiro (*Persea americana*), goiabeira (*Psidium guajava*) e jaqueira (*Artocarpus heterophyllus*), diversificam a produção e aumentam a disponibilidade de recursos alimentares para a fauna silvestre.

Essa maior complexidade estrutural favorece o estabelecimento de cadeias tróficas mais diversificadas e equilibradas, reduzindo a probabilidade de explosões populacionais de organismos-praga e fortalecendo os mecanismos naturais de controle biológico. Além disso, a heterogeneidade espacial da vegetação cria microambientes com diferentes condições de luminosidade, temperatura e umidade, ampliando a diversidade de habitats disponíveis para aves, insetos, anfíbios, pequenos mamíferos e microrganismos do solo (Perfecto; Vandermeer, 2010).

Embora o sistema ainda esteja em fase inicial de consolidação, as observações realizadas na propriedade indicam aumento gradual da cobertura vegetal, maior diversidade de espécies cultivadas e espontâneas, além da presença frequente de organismos associados à fauna benéfica, evidenciando o restabelecimento progressivo dos processos ecológicos característicos de agroecossistemas biodiversos. Esses resultados demonstram que a diversificação funcional promovida pelo SAF transcende a simples associação de culturas, constituindo um mecanismo fundamental para aumentar a estabilidade ecológica, a resiliência climática e a sustentabilidade da produção cafeeira. Essa reorganização da biodiversidade, bem como as principais interações ecológicas estabelecidas entre os diferentes componentes do sistema, encontra-se sintetizadas na Figura 33.



Figura 33. Biodiversidade e diversidade funcional no SAF do Sítio Relíquia do Caparaó: integração entre espécies arbóreas, frutíferas, cafeeiros, plantas de adubação verde e organismos benéficos que promovem a estabilidade ecológica do agroecossistema. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (ChatGPT).

Conforme ilustrado na Figura 33, a diversidade funcional resulta da complementariedade entre espécies vegetais e organismos associados, formando uma rede de interações ecológicas que favorece a ciclagem de nutrientes, o controle biológico, a polinização, a proteção do solo e a regulação microclimática. Essa integração amplia a capacidade de autorregulação do agroecossistema e cria condições favoráveis para a consolidação de processos ecológicos fundamentais à sustentabilidade da cafeicultura agroflorestal.

Entre esses processos, destacam-se aqueles relacionados à recuperação da qualidade física, química e biológica do solo, considerada um dos principais indicadores da evolução dos Sistemas Agroflorestais. O incremento da matéria orgânica, a intensificação da atividade biológica e a melhoria da estrutura do solo constituem respostas diretas ao aumento da biodiversidade funcional e ao aporte contínuo de biomassa, aspectos discutidos no tópico seguinte.

8.7.2. Qualidade física, química e biológica do solo

A recuperação da qualidade do solo constitui um dos principais indicadores de sucesso na implantação de SAFs, uma vez que o solo representa o principal compartimento integrador dos processos físicos, químicos e biológicos responsáveis pela sustentabilidade do agroecossistema. Em sistemas convencionais de produção, especialmente em áreas submetidas por longos períodos ao monocultivo e ao manejo intensivo, são frequentes problemas relacionados à compactação, redução da matéria orgânica, diminuição da atividade biológica e intensificação dos processos erosivos. Em contraste, os SAFs favorecem a reconstrução gradual desses atributos por meio da cobertura permanente do solo, do aporte contínuo de resíduos vegetais e da diversificação das espécies cultivadas (Silva *et al.*, 2021a; Sousa *et al.*, 2025; Neves *et al.*, 2026).

No Sítio Relíquia do Caparaó, a implantação do SAF promoveu mudanças visíveis na superfície do solo durante os primeiros dezoito meses de condução da área. A cobertura proporcionada pelas plantas espontâneas manejadas, pela biomassa oriunda das podas e pelos resíduos vegetais produzidos pelas espécies arbóreas e frutíferas reduziu significativamente a exposição direta do

solo às chuvas intensas e à radiação solar. Esse manejo conservacionista contribuiu para diminuir o impacto das gotas de chuva, reduzir o escoamento superficial e favorecer a manutenção da umidade, fatores essenciais em ambientes montanhosos característicos da região do Caparaó.

O incremento gradual da matéria orgânica representa outro aspecto de grande relevância observado no sistema. A deposição contínua de folhas, galhos, raízes e resíduos das espécies de adubação verde promove maior disponibilidade de carbono para os microrganismos do solo, intensificando os processos de decomposição, mineralização e ciclagem de nutrientes. Como consequência, ocorre melhoria da estrutura física do solo, aumento da estabilidade dos agregados e maior desenvolvimento do sistema radicular do cafeeiro, ampliando sua capacidade de absorção de água e nutrientes (Gliessman, 2015; Silva *et al.*, 2021a; Sousa *et al.*, 2025).

Além das melhorias físicas e químicas, a diversificação vegetal favorece o restabelecimento da atividade biológica do solo. Fungos, bactérias, actinomicetos, minhocas e outros organismos edáficos desempenham funções essenciais na decomposição da matéria orgânica, na formação de agregados estáveis e na disponibilização gradual de nutrientes para as plantas. Esses organismos constituem a base dos processos ecológicos que sustentam a fertilidade natural do sistema, reduzindo a dependência de insumos externos e aumentando a eficiência do uso dos recursos disponíveis (Jose, 2009; Neves *et al.*, 2026).

Outro benefício importante observado no Sítio Relíquia do Caparaó refere-se à redução dos processos erosivos. A presença de cobertura permanente do solo, associada à maior infiltração de água e à proteção conferida pelo componente arbóreo, contribui para diminuir as perdas de partículas do solo e de nutrientes, aspecto particularmente relevante em áreas de relevo acidentado. Essa condição fortalece a estabilidade física do terreno e favorece a conservação dos recursos naturais ao longo do tempo, corroborando os resultados apresentados por Silva *et al.* (2021a), Sousa *et al.* (2025) e Neves *et al.* (2026) para SAFs implantados em propriedades cafeeiras.

Embora a consolidação completa desses processos dependa de um período maior de desenvolvimento do sistema, as evidências observadas

indicam que o SAF já promove uma trajetória consistente de recuperação da qualidade do solo. O aumento da cobertura vegetal, a maior incorporação de matéria orgânica e a intensificação da atividade biológica demonstram que a restauração produtiva estimulada pelo Programa Reflorestar contribui simultaneamente para elevar a sustentabilidade ambiental, aumentar a resiliência do agroecossistema e criar condições favoráveis ao desenvolvimento de cafés especiais de elevada qualidade. A integração entre esses processos evidencia que a melhoria da qualidade do solo resulta da atuação conjunta de fatores físicos, químicos e biológicos, que passam a operar de forma sinérgica à medida que o SAF evolui. Essa dinâmica de recuperação ambiental é sintetizada na Figura 34.



Figura 34. Recuperação da qualidade física, química e biológica do solo no Sítio Relíquia do Caparaó: efeitos da cobertura permanente, do aporte de biomassa, da ciclagem de nutrientes e da atividade biológica sobre a conservação e a fertilidade do solo. Fonte: Acervo da Cafeteria Sítio Relíquia do Caparaó, 2026.

Conforme ilustrado na Figura 34, a melhoria da qualidade do solo constitui um processo integrado, no qual a cobertura permanente, o aporte contínuo de biomassa, a ciclagem de nutrientes e a atividade biológica reforçam-se mutuamente, promovendo a recuperação gradual da fertilidade e da estabilidade estrutural do agroecossistema. Esses processos não apenas favorecem o desenvolvimento do cafeeiro, mas também ampliam a capacidade do sistema

em conservar água, reduzir perdas por erosão e sustentar elevados níveis de atividade biológica, características fundamentais para a consolidação da sustentabilidade dos SAFs.

Entre os processos beneficiados pela melhoria da qualidade do solo, destaca-se a dinâmica hídrica do agroecossistema. O aumento da infiltração, da retenção de água e da proteção da superfície do solo influencia diretamente a disponibilidade hídrica para as plantas e a regulação microclimática, aspectos discutidos no tópico seguinte.

8.7.3. Conservação da água e infiltração no solo

A disponibilidade de água representa um dos fatores mais limitantes para a sustentabilidade da cafeicultura, especialmente em regiões montanhosas sujeitas à irregularidade das chuvas e aos efeitos das mudanças climáticas. Nesse contexto, a capacidade do agroecossistema de favorecer a infiltração da água no solo, reduzir o escoamento superficial e aumentar o armazenamento hídrico constitui um importante indicador ambiental da eficiência dos SAFs. Diferentemente dos sistemas convencionais, nos quais a exposição do solo favorece perdas de água e intensifica processos erosivos, os SAFs restabelecem mecanismos naturais do ciclo hidrológico por meio da cobertura permanente do solo e da maior complexidade estrutural da vegetação (Silva *et al.*, 2021a; Sousa *et al.*, 2025; Neves *et al.*, 2026).

No Sítio Relíquia do Caparaó, a implantação do SAF promoveu condições favoráveis à conservação da água desde os primeiros meses de estabelecimento da área. O aumento da cobertura vegetal, associado à deposição contínua de serapilheira e biomassa oriunda das podas, reduziu significativamente a exposição direta do solo às chuvas intensas, minimizando o impacto das gotas de chuva e favorecendo a infiltração da água ao longo do perfil do solo. Esse processo assume elevada importância em áreas de relevo acidentado, como as encostas do Caparaó, onde a perda de solo por erosão constitui uma das principais limitações à sustentabilidade da produção cafeeira.

A presença simultânea de cafeeiros, espécies arbóreas, frutíferas e plantas de cobertura amplia a rugosidade superficial do terreno e aumenta a quantidade

de poros biológicos formados pelo crescimento das raízes e pela atividade da fauna edáfica. Esses canais naturais facilitam a infiltração da água, reduzem o escoamento superficial e favorecem a recarga hídrica do solo, tornando maior o volume de água disponível para as plantas durante os períodos de estiagem (Jose, 2009; Gliessman, 2015; Almeida *et al.*, 2023).

Outro aspecto relevante refere-se à regulação microclimática promovida pelo componente arbóreo. O sombreamento parcial reduz a temperatura do solo e diminui as perdas de água por evaporação, enquanto a cobertura vegetal permanente atua como uma barreira física contra a ação direta dos ventos e da radiação solar. Como consequência, observa-se maior estabilidade da umidade edáfica, condição que favorece o desenvolvimento fisiológico do cafeeiro e reduz sua vulnerabilidade ao estresse hídrico (Silva *et al.*, 2021b; Neves *et al.*, 2026).

Além dos benefícios produtivos, a melhoria da dinâmica hídrica proporciona importantes ganhos ambientais. A redução do transporte de sedimentos e nutrientes para os cursos d'água contribui para a conservação da qualidade da água e para a manutenção dos serviços ecossistêmicos associados às microbacias hidrográficas. Sob essa perspectiva, os SAFs deixam de atuar apenas como sistemas agrícolas e passam a desempenhar função estratégica na proteção dos recursos hídricos e na adaptação da agricultura às mudanças climáticas (Sousa *et al.*, 2025; Neves *et al.*, 2026).

Embora avaliações quantitativas de infiltração, condutividade hidráulica e retenção de água ainda possam ser realizadas em etapas futuras de monitoramento da propriedade, as evidências observadas no Sítio Relíquia do Caparaó indicam uma trajetória consistente de recuperação da funcionalidade hidrológica do solo. A integração entre cobertura permanente, diversidade vegetal e manejo conservacionista demonstra que o SAF favorece a conservação da água, reduz os riscos de degradação ambiental e fortalece a resiliência hídrica da cafeicultura desenvolvida na região do Caparaó.

Embora avaliações quantitativas de infiltração, condutividade hidráulica e retenção de água ainda possam ser realizadas em etapas futuras de monitoramento da propriedade, as evidências observadas no Sítio Relíquia do Caparaó indicam uma trajetória consistente de recuperação da funcionalidade hidrológica do solo. A integração entre cobertura permanente, diversidade

vegetal, aporte contínuo de biomassa e manejo conservacionista favorece a infiltração da água, reduz o escoamento superficial e amplia a capacidade de armazenamento hídrico do solo, fortalecendo a resiliência da cafeicultura frente aos períodos de déficit hídrico.

Esses processos evidenciam que a conservação da água resulta da atuação conjunta de diferentes componentes ecológicos do SAF, cuja interação é sintetizada na Figura 35.



Figura 35. Conservação da água e melhoria da infiltração no Sistema Agroflorestal do Sítio Relíquia do Caparaó: efeitos da cobertura permanente do solo, da serapilheira, das raízes e da diversidade vegetal sobre a dinâmica hídrica e a proteção contra processos erosivos. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (ChatGPT).

Conforme ilustrado na Figura 35, a melhoria da dinâmica hídrica nos SAFs decorre da interação entre processos físicos, biológicos e ecológicos que atuam simultaneamente na conservação da água e do solo. A cobertura vegetal permanente, o sistema radicular diversificado, a deposição de serapilheira e a intensa atividade biológica aumentam a infiltração da água, reduzem o

escoamento superficial e favorecem a recarga hídrica do solo, criando condições mais estáveis para o desenvolvimento do cafeeiro e para a manutenção dos serviços ecossistêmicos associados às microbacias hidrográficas (Nair, 1993; Jose, 2009; Lal, 2020; Souza; Simão, 2024; Yang; Xiong; Xiao, 2024).

Além da conservação da água, a maior disponibilidade hídrica e a melhoria das condições microambientais repercutem diretamente sobre o desempenho fisiológico das plantas e sobre a capacidade do agroecossistema de regular sua temperatura e umidade. Esses efeitos ampliam a adaptação da cafeicultura aos eventos climáticos extremos e constituem um importante indicador da resiliência ambiental dos SAFs, aspecto discutido no tópico seguinte (Lin, 2007; Jose, 2009; Altieri; Nicholls, 2020; Yang; Xiong; Xiao, 2024).

8.7.4. Estoque e sequestro de carbono

O sequestro de carbono representa um dos principais serviços ecossistêmicos proporcionados pelos SAFs, assumindo papel estratégico tanto na mitigação das mudanças climáticas quanto na melhoria da qualidade ambiental dos agroecossistemas. Ao integrar espécies arbóreas, frutíferas e culturas agrícolas em um mesmo arranjo espacial, os SAFs ampliam significativamente a capacidade de fixação de carbono atmosférico na biomassa vegetal e no solo, diferenciando-se dos sistemas agrícolas convencionais, nos quais o armazenamento de carbono tende a ser reduzido em função da menor cobertura vegetal e da simplificação estrutural do ecossistema (Almeida *et al.*, 2023; Neves *et al.*, 2026).

No Sítio Relíquia do Caparaó, embora o SAF ainda esteja em fase inicial de desenvolvimento, já é possível observar um incremento expressivo da biomassa vegetal decorrente do crescimento simultâneo dos cafeeiros, das espécies arbóreas nativas, das frutíferas e das plantas de cobertura. Esse aumento da vegetação representa a primeira etapa do processo de sequestro de carbono, uma vez que a fotossíntese converte o dióxido de carbono atmosférico em biomassa vegetal, incorporando carbono aos diferentes compartimentos do sistema.

Além do carbono acumulado na parte aérea das plantas, o desenvolvimento do sistema radicular e o aporte contínuo de serapilheira promovem o enriquecimento gradual do carbono orgânico do solo. Folhas, galhos, raízes mortas e resíduos provenientes das podas passam a integrar os processos naturais de decomposição, contribuindo para a formação da matéria orgânica e para o aumento da estabilidade estrutural do solo. Esse mecanismo fortalece simultaneamente a fertilidade, a retenção de água, a atividade microbiológica e a capacidade de armazenamento de carbono ao longo do tempo (Silva *et al.*, 2021a; Almeida *et al.*, 2023).

A presença de diferentes estratos vegetais também amplia a eficiência do sistema na utilização da energia solar e na produção de biomassa. Árvores de crescimento lento, espécies frutíferas, bananeiras e cafeeiros passam a ocupar nichos ecológicos distintos, aumentando a captura de carbono em diferentes alturas e compartimentos do agroecossistema. Sob a perspectiva da Ecologia de Ecossistemas, essa maior complexidade estrutural resulta em fluxos mais eficientes de matéria e energia, favorecendo a estabilidade ecológica e ampliando a capacidade do sistema de responder às oscilações climáticas (Odum, 1988; Gliessman, 2015).

Outro aspecto relevante refere-se ao potencial dos SAFs para integrar conservação ambiental e geração de renda. Espécies madeireiras implantadas no sistema, como ipê-amarelo (*Handroanthus albus*) e cedro (*Cedrela fissilis*), além de contribuírem para o estoque de carbono, representam ativos florestais de elevado valor econômico, possibilitando retorno financeiro futuro por meio de manejo sustentável. Essa característica evidencia que o carbono deixa de ser apenas um indicador ambiental e passa a constituir também um componente estratégico da sustentabilidade econômica da propriedade (Almeida *et al.*, 2023; Sousa *et al.*, 2025).

Embora ainda não tenham sido realizadas estimativas quantitativas do estoque de carbono no Sítio Relíquia do Caparaó, as características estruturais observadas indicam uma trajetória consistente de incremento da biomassa vegetal e do carbono orgânico do solo. À medida que o sistema amadurece, espera-se um aumento progressivo da capacidade de sequestro e armazenamento de carbono, reforçando simultaneamente a mitigação das

mudanças climáticas, a melhoria da fertilidade do solo e a consolidação de uma cafeicultura ambientalmente regenerativa.

A experiência do Sítio Relíquia demonstra que os SAFs transcendem a função produtiva da propriedade rural, passando a atuar como importantes sumidouros de carbono e fornecedores de serviços ecossistêmicos. Essa condição fortalece iniciativas de restauração produtiva, programas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e, potencialmente, mecanismos de remuneração associados aos mercados voluntários de carbono. A integração entre os diferentes compartimentos de armazenamento de carbono e seus efeitos sobre a sustentabilidade ambiental do agroecossistema é sintetizada na Figura 36.



Figura 36. Sequestro e armazenamento de carbono no Sistema Agroflorestal do Sítio Relíquia do Caparaó: contribuição da biomassa arbórea, dos cafeeiros, das raízes e da matéria orgânica do solo para a mitigação das mudanças climáticas e a sustentabilidade da cafeicultura. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), a partir de Almeida *et al.* (2023) e Sousa *et al.* (2025), com auxílio de IA (ChatGPT).

Conforme ilustrado na Figura 36, o carbono encontra-se distribuído em diferentes compartimentos do SAF, incluindo a biomassa arbórea, os cafeeiros, o sistema radicular, a serapilheira e a matéria orgânica do solo. A interação entre esses compartimentos estabelece um fluxo contínuo de captura, armazenamento e reciclagem de carbono, contribuindo simultaneamente para a regulação climática, a conservação da fertilidade do solo e o fortalecimento da resiliência ecológica do agroecossistema (Nair, 1993; Jose, 2009; Lal, 2020; Almeida *et al.*, 2023).

Além de favorecer a mitigação das mudanças climáticas, o aumento da biomassa vegetal amplia a disponibilidade de habitats e de recursos alimentares para diferentes grupos da fauna, fortalecendo as interações ecológicas que sustentam o funcionamento dos SAFs. Dessa forma, a recuperação da vegetação repercute diretamente sobre a diversidade de organismos associados, aspecto fundamental para a manutenção do equilíbrio ecológico e discutido no tópico seguinte.

8.7.5. Fauna associada e equilíbrio ecológico

A fauna constitui um dos mais importantes indicadores da recuperação funcional de agroecossistemas, uma vez que sua presença reflete a disponibilidade de habitat, alimento, abrigo e conectividade da paisagem. Em SAFs, a diversificação da vegetação promove condições favoráveis ao estabelecimento de diferentes grupos faunísticos, ampliando a complexidade das cadeias tróficas e fortalecendo os mecanismos naturais de autorregulação ecológica. Dessa forma, aves, insetos, mamíferos, anfíbios, répteis e organismos do solo passam a desempenhar funções essenciais relacionadas à polinização, dispersão de sementes, decomposição da matéria orgânica e controle biológico de pragas (Altieri; Nicholls, 2004; Jose, 2009; Neves *et al.*, 2026).

No Sítio Relíquia do Caparaó, a implantação do SAF promoveu uma ampliação gradual da heterogeneidade ambiental, criando condições mais favoráveis para o estabelecimento da fauna silvestre. A presença simultânea de cafeeiros, árvores nativas, frutíferas, bananeiras, plantas de cobertura e áreas florestais adjacentes proporciona diferentes nichos ecológicos, favorecendo a

ocupação da área por organismos com distintas exigências ecológicas. Essa maior diversidade estrutural diferencia o SAF dos sistemas simplificados de monocultivo, nos quais a oferta de recursos alimentares e de abrigo é limitada.

Entre os grupos de maior importância ecológica destacam-se os insetos polinizadores, especialmente abelhas nativas e *Apis mellifera*, cuja atividade contribui para o aumento da polinização cruzada, da formação dos frutos e da uniformidade dos grãos de café. Paralelamente, joaninhas, crisopídeos, aranhas, vespas parasitoides e outros inimigos naturais atuam na regulação das populações de insetos fitófagos, reduzindo a necessidade de intervenções químicas e fortalecendo os processos naturais de controle biológico (Silva *et al.*, 2021a; Silva *et al.*, 2021b).

As aves representam outro componente relevante da biodiversidade funcional. Espécies insetívoras contribuem para o controle de diversos artrópodes potencialmente prejudiciais à lavoura, enquanto aves frugívoras participam da dispersão de sementes e da manutenção da dinâmica ecológica da paisagem. A proximidade do Sítio Relíquia com remanescentes florestais da região do Caparaó amplia essa conectividade ecológica, favorecendo o deslocamento da fauna entre diferentes ambientes e aumentando a estabilidade do agroecossistema (Sousa *et al.*, 2025).

Além da fauna de superfície, merece destaque a fauna edáfica, composta por minhocas, formigas, cupins, colêmbolos, ácaros e inúmeros outros invertebrados que participam da fragmentação da matéria orgânica, da formação de agregados estáveis e da criação de galerias que favorecem a infiltração de água e a aeração do solo. Esses organismos atuam de forma integrada com fungos e bactérias, acelerando a ciclagem de nutrientes e contribuindo para a manutenção da fertilidade natural do sistema (Gliessman, 2015; Neves *et al.*, 2026).

Sob a perspectiva da Ecologia de Ecossistemas, a fauna desempenha papel estratégico na manutenção dos fluxos de energia e matéria. Quanto maior a diversidade de organismos presentes no sistema, maior tende a ser a redundância funcional e a capacidade de resposta frente às perturbações ambientais. Essa característica aumenta a resiliência do agroecossistema, reduz

a ocorrência de desequilíbrios populacionais e favorece a estabilidade produtiva ao longo do tempo (Loreau, 2010; Tilman; Isbell; Cowles, 2014).

Embora o monitoramento sistemático da fauna ainda possa ser ampliado por meio de inventários específicos, armadilhas fotográficas, levantamentos de avifauna e estudos com insetos polinizadores, as evidências observadas no Sítio Relíquia do Caparaó indicam que a implantação do SAF já favorece a recuperação gradual da biodiversidade animal. Esses resultados reforçam que a fauna não representa apenas um componente da conservação ambiental, mas constitui um elemento essencial para o funcionamento ecológico, a estabilidade biológica e a sustentabilidade da cafeicultura agroflorestal. À medida que aumenta a complexidade estrutural da vegetação, ampliam-se também as interações entre polinizadores, inimigos naturais, fauna edáfica e demais organismos associados, fortalecendo os processos ecológicos responsáveis pela autorregulação do agroecossistema. Essa integração entre os diferentes grupos faunísticos e suas funções ecológicas é sintetizada na Figura 37.

Conforme ilustrado na Figura 37, a fauna desempenha papel integrador no funcionamento dos SAFs, estabelecendo conexões entre diferentes níveis tróficos e contribuindo para a manutenção dos fluxos de energia, da ciclagem de nutrientes, da polinização e do controle biológico. A diversidade de organismos presentes aumenta a redundância funcional do sistema, tornando-o mais estável, resiliente e menos suscetível a desequilíbrios ecológicos provocados por eventos climáticos extremos ou pela ocorrência de pragas e doenças (Jose, 2009; Loreau, 2010; Tilman; Isbell; Cowles, 2014; Altieri; Nicholls, 2020).

Em conjunto, os indicadores ambientais discutidos ao longo desta seção evidenciam que a implantação do SAF no Sítio Relíquia do Caparaó promove um processo integrado de restauração ecológica, no qual biodiversidade, qualidade do solo, conservação da água, sequestro de carbono e recuperação da fauna atuam de forma complementar para fortalecer a sustentabilidade da cafeicultura. Embora muitos desses processos ainda estejam em fase de consolidação, as evidências observadas demonstram uma trajetória consistente de evolução ambiental, compatível com os princípios da agroecologia e com os objetivos da restauração produtiva promovida pelo Programa Reflorestar (Jose, 2009; Gliessman, 2015; FAO, 2021; Yang; Xiong; Xiao, 2024).



Figura 37. Fauna associada ao SAF do Sítio Relíquia do Caparaó: interação entre polinizadores, inimigos naturais, aves, fauna edáfica e demais organismos que contribuem para o equilíbrio ecológico, a ciclagem de nutrientes e o controle biológico no agroecossistema. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (ChatGPT).

A análise integrada desses indicadores demonstra que a consolidação de SAFs depende da interação contínua entre processos ecológicos, manejo técnico qualificado e acompanhamento sistemático da evolução do agroecossistema, evidenciando que a sustentabilidade resulta de um processo dinâmico de construção e aperfeiçoamento permanente.

8.8. Lições aprendidas

A implantação do SAF no Sítio Relíquia do Caparaó evidenciou que a transição de modelos convencionais para sistemas produtivos biodiversos demanda planejamento, acompanhamento técnico e visão de longo prazo. Embora os resultados obtidos durante os primeiros dezoito meses já demonstrem avanços significativos na recuperação ambiental e no desenvolvimento da lavoura cafeeira, a experiência acumulada ao longo desse

período permitiu identificar fatores determinantes para o sucesso da implantação, bem como desafios inerentes ao processo de restauração produtiva.

Uma das principais lições refere-se à importância do planejamento inicial do sistema. A seleção criteriosa das espécies, a definição dos espaçamentos, o conhecimento das características ecológicas de cada componente vegetal e a organização dos diferentes estratos mostraram-se fundamentais para evitar competição excessiva por luz, água e nutrientes. A adoção desses critérios permitiu compatibilizar a produção de café com os objetivos de conservação ambiental estabelecido pelo Programa Reflorestar, favorecendo a construção de um sistema produtivo funcional e ecologicamente equilibrado (Silva *et al.*, 2021a; Neves *et al.*, 2026).

Outro aspecto observado foi a relevância da assistência técnica durante todas as etapas de implantação. O acompanhamento realizado pelas equipes envolvidas possibilitou adequações no manejo, orientação quanto às podas, monitoramento do desenvolvimento das espécies e tomada de decisões compatíveis com a evolução do sistema. Essa interação entre conhecimento técnico e experiência prática do produtor mostrou-se essencial para minimizar riscos e potencializar os benefícios ambientais e produtivos do SAF (Sousa *et al.*, 2025).

O manejo da biomassa destacou-se como um dos componentes mais importantes do sistema. A utilização dos resíduos provenientes das podas e das plantas de cobertura como cobertura morta promoveu proteção permanente do solo, incremento da matéria orgânica, redução da erosão e maior conservação da umidade. Esses efeitos demonstram que, nos SAFs, a biomassa deixa de ser um simples resíduo agrícola para constituir um recurso estratégico capaz de sustentar a ciclagem de nutrientes, proteger o solo, estimular a atividade biológica e manter a estabilidade ecológica do agroecossistema (Nair, 1993; Gliessman, 2015; Sousa *et al.*, 2025).

A experiência também evidenciou que a implantação de SAFs exige mudança de percepção por parte do produtor. Diferentemente dos modelos convencionais, nos quais os resultados costumam ser avaliados predominantemente pela produtividade imediata, os SAFs devem ser

compreendidos como sistemas dinâmicos cuja eficiência aumenta gradativamente à medida que os processos ecológicos se consolidam. O desenvolvimento das árvores, a formação da serapilheira, o aumento da biodiversidade e a recuperação da qualidade do solo constituem processos ecológicos cumulativos que demandam tempo, mas proporcionam benefícios duradouros para a propriedade (Gliessman, 2015; Almeida *et al.*, 2023).

Dessa forma, o Sítio Relíquia do Caparaó demonstra que políticas públicas de incentivo, como o Programa Reflorestar, podem atuar como importantes catalisadores da transição agroecológica quando associadas ao compromisso dos produtores e ao suporte técnico especializado. A experiência desenvolvida na propriedade evidencia que a integração entre conservação ambiental e produção agrícola é plenamente viável, constituindo uma referência para agricultores familiares interessados na adoção de Sistemas Agroflorestais como estratégia de desenvolvimento rural sustentável (Miccolis *et al.*, 2016; Programa Reflorestar, 2025; Mendonça *et al.*, 2026).

Em conjunto, as experiências acumuladas durante a implantação do SAF demonstram que a transição agroecológica constitui um processo contínuo de aprendizagem, adaptação e aperfeiçoamento do manejo. As lições obtidas no Sítio Relíquia do Caparaó não apenas validam os benefícios ambientais, produtivos e socioeconômicos discutidos ao longo deste estudo, mas também fornecem subsídios técnicos para orientar novas iniciativas de restauração produtiva em propriedades com características semelhantes. Ao mesmo tempo, evidenciam que a consolidação desses sistemas depende do monitoramento permanente de indicadores ambientais, produtivos e econômicos, do aperfeiçoamento contínuo das estratégias de manejo e da geração de conhecimento ao longo do tempo, fundamentos que orientam as perspectivas futuras apresentadas na seção seguinte (Altieri, 2012; Gliessman, 2016; Miccolis *et al.*, 2016).

8.9. Perspectivas futuras

Embora os resultados observados durante a fase inicial de implantação sejam promissores, o Sistema Agroflorestal do Sítio Relíquia do Caparaó ainda

se encontra em processo de consolidação ecológica. O crescimento do componente arbóreo, o acúmulo progressivo de biomassa, a ampliação da diversidade biológica e a evolução dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo tendem a intensificar os benefícios ambientais e produtivos ao longo dos próximos anos, reforçando o caráter dinâmico dos SAFs.

Entre as perspectivas futuras destaca-se a continuidade do monitoramento ambiental da área, possibilitando a obtenção de indicadores quantitativos relacionados ao estoque de carbono, à infiltração de água, à biodiversidade, à atividade biológica do solo e à fauna associada. Essas informações poderão subsidiar novas pesquisas científicas e ampliar o conhecimento sobre o desempenho de Sistemas Agroflorestais em regiões montanhosas da Mata Atlântica.

Outro aspecto promissor refere-se à crescente valorização dos serviços ambientais proporcionados pelos SAFs. A evolução de programas de Pagamento por Serviços Ambientais, aliada às iniciativas de restauração ecológica e aos mercados voluntários de carbono, poderá ampliar as oportunidades de valorização econômica de propriedades que conciliam produção agrícola, conservação ambiental e recuperação da vegetação nativa (Almeida *et al.*, 2023; Neves *et al.*, 2026).

Do ponto de vista produtivo, o amadurecimento do componente arbóreo deverá fortalecer a estabilidade microclimática da lavoura cafeeira, ampliar a ciclagem de nutrientes e consolidar uma produção cada vez mais alinhada aos princípios da agroecologia. Paralelamente, a crescente demanda por cafés produzidos em sistemas sustentáveis, rastreáveis e ambientalmente responsáveis tende a agregar valor ao produto, favorecendo sua inserção em mercados diferenciados.

A experiência desenvolvida no Sítio Relíquia do Caparaó evidencia que os Sistemas Agroflorestais representam muito mais que uma alternativa de produção agrícola. Constituem uma estratégia integrada de restauração ambiental, conservação dos recursos naturais e fortalecimento da agricultura familiar, demonstrando que produtividade, biodiversidade e sustentabilidade podem coexistir em um mesmo sistema produtivo. Espera-se que os resultados apresentados neste estudo de caso estimulem novas iniciativas de pesquisa,

extensão rural e adoção de SAFs em outras propriedades cafeeiras da região do Caparaó e de diferentes territórios produtores de café no Brasil.

Entre as perspectivas futuras para o Sítio Relíquia do Caparaó destaca-se a consolidação do agroturismo como estratégia complementar de valorização da propriedade. A integração entre cafeicultura agroflorestal, conservação ambiental e experiências educativas amplia as oportunidades de geração de renda, fortalece a identidade territorial e aproxima consumidores dos processos sustentáveis de produção. Visitas técnicas, dias de campo, degustações de cafés especiais e atividades de educação ambiental podem transformar a propriedade em um espaço permanente de difusão do conhecimento agroecológico, contribuindo simultaneamente para o desenvolvimento rural, a valorização da agricultura familiar e a sensibilização da sociedade quanto à importância dos SAFs. Esse potencial de integração entre produção, turismo, educação e conservação ambiental é ilustrado na Figura 38.

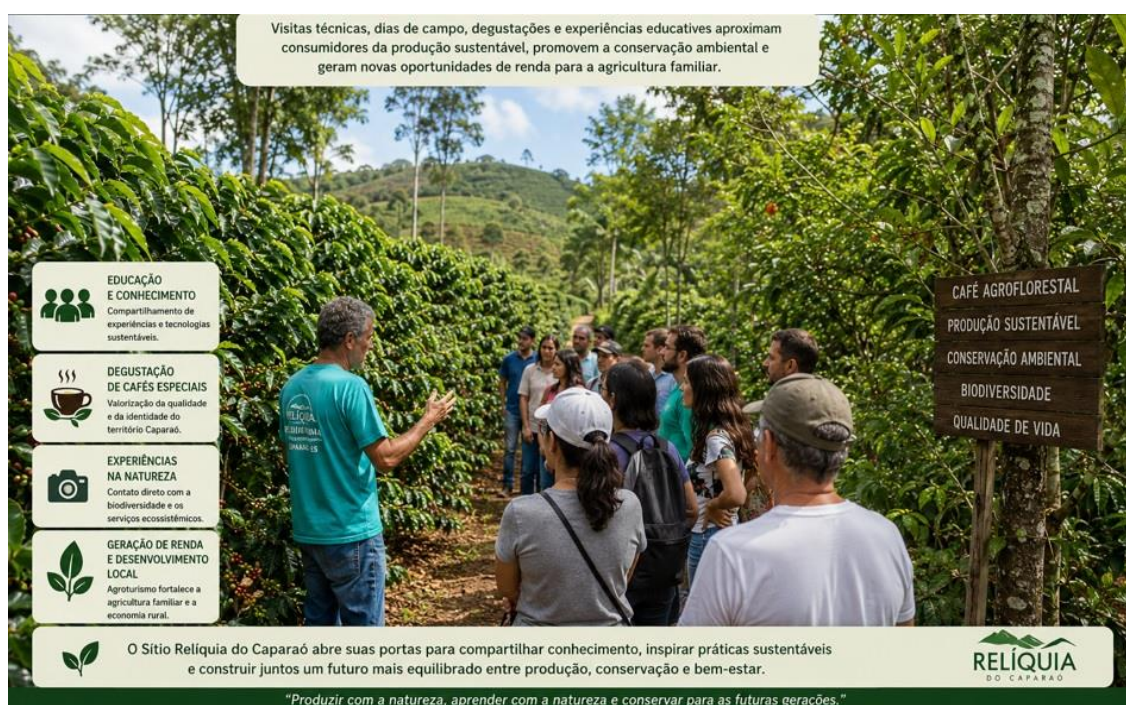


Figura 38. Visita técnica às áreas de produção de cafés especiais do Sítio Relíquia do Caparaó, destacando o potencial da propriedade para integrar agroturismo, educação ambiental e difusão de tecnologias sustentáveis na cafeicultura. Fonte: Acervo do Sítio Relíquia do Caparaó, 2025.

Conforme ilustrado na Figura 38, a abertura da propriedade para visitas técnicas, atividades de extensão rural e experiências de turismo de base comunitária amplia significativamente a função social do Sistema Agroflorestal. O espaço deixa de exercer apenas o papel de unidade produtiva e passa a constituir um ambiente de aprendizagem, intercâmbio de conhecimentos, demonstração de tecnologias sustentáveis e valorização do patrimônio ambiental e cultural da região do Caparaó. A interação entre produtores, pesquisadores, estudantes, extensionistas e consumidores fortalece a difusão da agroecologia e contribui para ampliar a adoção de Sistemas Agroflorestais em outras propriedades rurais (Caporal; Costabeber, 2004; Miccolis *et al.*, 2016).

Sob essa perspectiva, o Sítio Relíquia do Caparaó consolida-se como uma unidade demonstrativa de restauração produtiva, evidenciando que a integração entre conservação ambiental, produção de cafés especiais, educação, pesquisa, extensão rural e agroturismo pode gerar benefícios ambientais, econômicos e sociais de forma simultânea. Essa experiência sintetiza os principais conceitos discutidos ao longo deste estudo de caso e fornece uma base consistente para as considerações finais apresentadas na seção seguinte (Altieri, 2012; Gliessman, 2016; Mendonça *et al.*, 2026).

A abertura da propriedade para visitas técnicas, atividades de extensão rural e experiências de turismo de base comunitária amplia a função social do Sistema Agroflorestal, que deixa de ser apenas um ambiente de produção para tornar-se um espaço de aprendizagem, intercâmbio de conhecimentos e valorização do patrimônio ambiental e cultural da região do Caparaó. Dessa forma, o Sítio Relíquia consolida-se como um exemplo de que a sustentabilidade pode gerar benefícios ambientais, produtivos, científicos e turísticos, fortalecendo a conexão entre conservação da natureza, produção de cafés especiais e desenvolvimento territorial.

8.10. Considerações finais do estudo de caso do Sítio Relíquia do Caparaó

A experiência desenvolvida no Sítio Relíquia do Caparaó demonstra que os SAFs constituem uma alternativa tecnicamente viável para integrar produção agrícola, restauração ecológica e conservação dos recursos naturais. Mesmo em

um período relativamente curto de implantação, foi possível observar melhorias expressivas na cobertura vegetal, na proteção do solo, na conservação da água, na diversificação biológica e no desenvolvimento da lavoura cafeeira, evidenciando o potencial dos SAFs para promover sistemas produtivos mais resilientes e sustentáveis.

Mais do que uma propriedade produtora de café, o Sítio Relíquia consolida-se como um espaço de inovação, aprendizagem e demonstração prática dos princípios agroecológicos discutidos ao longo desta obra. A experiência evidencia que a adoção de arranjos agroflorestais, quando associada ao planejamento técnico, ao acompanhamento especializado e ao comprometimento do produtor, possibilita conciliar produção agrícola, conservação ambiental e recuperação dos processos ecológicos que sustentam a sustentabilidade dos agroecossistemas.

A inserção da propriedade no Programa Reflorestar reforça a importância das políticas públicas voltadas à restauração produtiva e ao Pagamento por Serviços Ambientais, demonstrando que incentivos institucionais podem acelerar processos de recuperação ambiental, fortalecer a conservação dos recursos naturais e estimular a adoção de sistemas produtivos mais sustentáveis na cafeicultura.

Assim, o estudo de caso confirma que a sustentabilidade da cafeicultura não depende exclusivamente da adoção isolada de tecnologias, mas da construção de agroecossistemas capazes de restabelecer processos ecológicos, fortalecer a biodiversidade e aumentar a resiliência frente às mudanças climáticas. Nesse contexto, o Sítio Relíquia do Caparaó representa uma referência regional na integração entre ciência, assistência técnica, políticas públicas e conhecimento do agricultor, servindo como modelo inspirador para novas iniciativas de implantação de Sistemas Agroflorestais em propriedades cafeeiras do Caparaó e de outras regiões produtoras do Brasil. A consolidação dessa experiência, integrando produção agrícola, conservação ambiental e restauração ecológica, é sintetizada na Figura 39.

Conforme ilustrado na Figura 39, o SAF implantado no Sítio Relíquia do Caparaó materializa, em escala de propriedade rural, os princípios ecológicos e produtivos discutidos ao longo deste estudo de caso. A integração entre

cafeeiros, espécies arbóreas e a paisagem regional evidencia que a restauração ambiental pode ser compatibilizada com a produção agrícola, promovendo simultaneamente a conservação do solo e da água, a ampliação da biodiversidade, a melhoria das condições microclimáticas e o fortalecimento da resiliência dos agroecossistemas frente às mudanças climáticas (Gliessman, 2015; Miccolis *et al.*, 2016; Altieri; Nicholls, 2020).



Figura 39. Vista panorâmica do SAF implantado no Sítio Relíquia do Caparaó, evidenciando a integração entre cafeicultura, espécies arbóreas e paisagem da região do Caparaó. Fonte: Acervo do Sítio Relíquia do Caparaó (2025).

Os resultados apresentados ao longo deste estudo de caso demonstram que os SAFs constituem uma estratégia promissora para a construção de sistemas cafeeiros mais sustentáveis. Embora muitos de seus benefícios se intensifiquem ao longo do tempo, a experiência do Sítio Relíquia do Caparaó evidencia que a adoção de princípios agroecológicos já promove, desde os primeiros anos de implantação, avanços significativos na recuperação ambiental e na organização ecológica da propriedade. Dessa forma, o Sítio Relíquia reafirma o potencial dos SAFs como modelo de produção capaz de integrar conservação da natureza, adaptação às mudanças climáticas e fortalecimento da cafeicultura brasileira.

Seção 9

Considerações finais

A cafeicultura contemporânea enfrenta desafios cada vez mais complexos, decorrentes das mudanças climáticas, da degradação dos recursos naturais, da perda de biodiversidade e da crescente necessidade de produzir alimentos de forma ambientalmente responsável. Nesse contexto, torna-se evidente que modelos produtivos baseados na simplificação dos agroecossistemas e na elevada dependência de insumos externos apresentam limitações para responder às demandas da agricultura do século XXI. A construção de sistemas produtivos mais resilientes exige uma mudança de paradigma, na qual os processos ecológicos deixam de ser compreendidos apenas como elementos naturais e passam a constituir os próprios alicerces da produtividade, da sustentabilidade e da permanência da atividade agrícola.

Ao longo desta obra, procurou-se demonstrar que os Sistemas Agroflorestais representam uma das expressões mais consistentes dessa transformação. Muito além da introdução de espécies arbóreas na lavoura cafeeira, esses sistemas fundamentam-se na integração entre biodiversidade, conhecimento científico, planejamento e manejo ecológico dos recursos naturais. Ao reproduzirem parte da estrutura e do funcionamento dos ecossistemas naturais, favorecem a ciclagem de nutrientes, a conservação do solo e da água, a regulação microclimática, o incremento da matéria orgânica, a polinização, o controle biológico e diversos outros serviços ecossistêmicos indispensáveis à estabilidade e à resiliência dos agroecossistemas.

Os diferentes capítulos evidenciaram que a biodiversidade funcional constitui um dos principais mecanismos responsáveis pelo desempenho desses sistemas. A diversidade de plantas, microrganismos, polinizadores, inimigos naturais e demais organismos benéficos estabelece uma complexa rede de interações ecológicas capaz de ampliar a estabilidade do sistema, reduzir a dependência de insumos externos e fortalecer sua capacidade de adaptação frente às incertezas ambientais. Sob essa perspectiva, produzir café deixa de significar apenas maximizar a produtividade e passa a envolver a construção de

agroecossistemas capazes de conservar seus próprios processos de autorregulação.

Da mesma forma, os fundamentos da Agroecologia discutidos nesta obra demonstram que a sustentabilidade da cafeicultura depende da integração entre diferentes dimensões do conhecimento. Conceitos como sucessão ecológica, estratificação da vegetação, nichos ecológicos, relações interespecíficas, agricultura regenerativa e manejo da biodiversidade evidenciam que o funcionamento dos Sistemas Agroflorestais resulta da interação permanente entre componentes bióticos, abióticos e sociais. O agricultor assume, assim, um papel estratégico como gestor dos processos ecológicos que sustentam a produtividade, a conservação ambiental e a qualidade dos agroecossistemas.

O estudo de caso desenvolvido no Sítio Relíquia do Caparaó permitiu demonstrar, em condições reais de campo, que esses princípios podem ser incorporados com sucesso à cafeicultura. A experiência evidenciou que a integração entre planejamento técnico, assistência especializada, compromisso do produtor e políticas públicas, representadas pelo Programa Reflorestar, possibilita conciliar recuperação ambiental, conservação da biodiversidade, produção de cafés de qualidade, diversificação da propriedade e fortalecimento da agricultura familiar. Mais do que validar conceitos teóricos, o estudo de caso demonstra que a transição agroecológica constitui um processo viável e capaz de produzir benefícios ambientais, econômicos e sociais simultaneamente.

Outro aspecto amplamente discutido refere-se à crescente valorização dos serviços ecossistêmicos proporcionados pelos Sistemas Agroflorestais. A proteção dos recursos hídricos, a conservação da biodiversidade, o sequestro de carbono, a melhoria da fertilidade do solo, a regulação climática, a polinização e o controle biológico deixam de representar apenas benefícios indiretos da produção agrícola para constituírem ativos estratégicos capazes de agregar valor aos cafés produzidos, fortalecer a identidade territorial, ampliar oportunidades econômicas e contribuir para a construção de paisagens rurais mais sustentáveis.

Entretanto, a consolidação da cafeicultura agroflorestal depende da continuidade dos investimentos em pesquisa científica, assistência técnica, extensão rural, formação profissional e políticas públicas que estimulem a adoção de práticas conservacionistas. Da mesma forma, tecnologias como

sensoriamento remoto, *drones*, agricultura de precisão, inteligência artificial e plataformas digitais de monitoramento tendem a ampliar a eficiência do planejamento e do manejo dos Sistemas Agroflorestais, demonstrando que inovação tecnológica e processos ecológicos não são abordagens antagônicas, mas componentes complementares de uma agricultura moderna e sustentável.

Portanto, pode-se ponderar que os Sistemas Agroflorestais representam muito mais do que uma técnica de cultivo. Constituem uma estratégia de reorganização dos agroecossistemas fundamentada na integração entre biodiversidade, processos ecológicos, inovação tecnológica, valorização territorial e desenvolvimento sustentável. Ao aproximar a produção agrícola do funcionamento dos ecossistemas naturais, esses sistemas demonstram que é possível produzir cafés de elevada qualidade enquanto se conservam os recursos naturais, se fortalecem as comunidades rurais e se ampliam as oportunidades para as futuras gerações.

Mais do que apresentar respostas definitivas, esta obra procura contribuir para o fortalecimento do conhecimento científico e estimular novas formas de compreender a cafeicultura. Espera-se que os conceitos, experiências e reflexões aqui reunidos inspirem pesquisadores, extensionistas, estudantes, técnicos e produtores a construir agroecossistemas cada vez mais biodiversos, resilientes e regenerativos, reafirmando que o futuro da cafeicultura dependerá da capacidade de integrar ciência, natureza e ação humana em benefício de uma agricultura verdadeiramente sustentável.

10. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. R.; GUERRA, A. C. M.; BISPO, V. dos S. C.; TRUGILHO, G. A.; XAVIER, S. A. B.; NASCIMENTO, L. M. Q. do; AZEVEDO, P. L.; SOUZA, M. N. Produção de madeira, sequestro de carbono, SAFs e fomento florestal. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas. Vol. VII.** – Canoas, RS: Mérida Publishers, 2023. p. 150-182. ISBN: 978-65-84548-18-3. DOI: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-18-3.c5>.
- ALTIERI, M. A. **Agroecologia: a dinâmica científica da agricultura sustentável**. 3. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2001. 110p.
- 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, 2012.
- ALTIERI, M. A. Agroecology: Echoing agroecology. **Third World Resurgence**, n. 264, p. 31-34, 2012.
- ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I. Agroecology and the emergence of a post-COVID-19 agriculture. **Agriculture and Human Values**, Dordrecht, v. 37, n. 3, p. 525-526, 2020.
- ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I. Agroecology and the reconstruction of a post-COVID-19 agriculture. **The Journal of Peasant Studies**, v. 47, n. 5, p. 881-898, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/03066150.2020.1782891>.
- ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I. **Biodiversity and pest management in agroecosystems**. 2. ed. New York: Haworth Press, 2004.
- ANDRADE, D. C.; SILVA, R. F.; SOUZA, L. A.; MENDONÇA, M. A. F. Agroforestry systems based on successional principles: a review of concepts and practices. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 4, p. 1321-1334, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00492-4>.
- ANDRADE, E. M.; VALBRUN, W.; ALMEIDA, A. M. M. de; ROSA, G.; SILVA, A. G. R. da. Land-Use Effect on Soil Carbon and Nitrogen Stock in a Seasonally Dry Tropical Forest. **Agronomy**, Basel, v. 10, n. 2, art. 158, 2020. DOI: [10.3390/agronomy10020158](https://doi.org/10.3390/agronomy10020158).
- ANDRADE, M. S.; PASINI, F. S. **Agricultura sintrópica: fundamentos ecológicos e aplicações em sistemas agroflorestais**. Brasília: Embrapa, 2024.
- ARAÚJO, J. B. S. Sistema agroflorestal sucessional na visão do setor público – Incaper. In: **Agricultura Sintrópica**. Vitória: Incaper, 2019.
- ASSIS, C. P.; OLIVEIRA, T. S.; DANTAS, J. A. N.; MENDONÇA, E. S. Organic matter and phosphorus fractions in irrigated agroecosystems in a semi-arid region

of Northeastern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 138, n. 1-2, p. 74-82, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.03.015>.

ASSUNÇÃO, S.; MOREIRA, W. H.; DE OLIVEIRA, S. P.; TAVARES, R. L. M.; DE SOUZA, Z. M.; LA SCALA, N. Carbon input and the structural quality of soil organic matter as a function of agricultural management in a tropical climate region of Brazil. **The Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 658, p. 901-911, 2019.

AVELLAR, A. O. **Sistema setorial de inovação**: aplicação do conceito à produção de café conilon no estado do Espírito Santo. 2014.

BEER, J.; MUSCHLER, R.; KASS, D.; SOMARRIBA, E. Shade management in coffee and cacao plantations. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 38, n. 1-3, p. 139-164, 1998. DOI: 10.1023/A:1005956528316.

BEGON, M.; TOWNSEND, C. R.; HARPER, J. L. **Ecologia**: de indivíduos a ecossistemas. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2007.

BENTO, G. dos S.; ALVES, T. de S.; PELUZIO, J. B. E.; SIMÃO, J. B. P.; SOUZA, M. N. Caracterização de cafés da denominação de origem Caparaó, analisados no Ifes – campus de Alegre em 2020. In: SIMÃO, J. B. P.; PELUZIO, T. M. de O.; PELUZIO, J. B. E.; ZACARIAS, A. J.; JAEGGI, M. E. P. da C.; LIMA, M. da S. P. (Org.) **A cafeicultura do Caparaó**: resultados de pesquisas V. Vitória, ES: Edifes Parceria, p. 99-119. 2022. ISBN: 978-85-8263-563-6. DOI: 10.36524/9788582635636.

BERTALANFFY, L. V. **Teoria geral dos sistemas**. Petrópolis: Vozes, 1975.

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, 2025b. p. 257-281. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-35-0.c9>.

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>.

BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN NETO, L.; ANDRADE, C. A. de (Ed.). **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Brasília: Embrapa, 2025.

BIGHI, A. R.; OLIVEIRA, C. H. R. de; SARTORIO, C. R.; TEIXEIRA, I. da C.; SOUZA, M. N. A importância do componente arbóreo nos sistemas agroflorestais. In: SOUZA, M. N. (Org.). **Tópicos em recuperação de áreas degradadas. Vol. VIII**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2024. p. 191-216. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-25-1.c6>.

BINI, D.; SANTOS, C. A.; CARMO, K. B.; KISHINO, N.; ANDRADE, G.; ZANGARO, W.; NOGUEIRA, M. A. Effects of land use on soil organic carbon and microbial processes associated with soil health in southern Brazil. **European Journal of Soil Biology**, [S. l.], v. 55, p. 117-123, 2013. DOI: 10.1016/j.ejsobi.2012.12.010.

BRASIL. **Lei nº 12.188, de 11 de janeiro de 2010**. Institui a Política Nacional de Assistência Técnica e Extensão Rural para a Agricultura Familiar e Reforma Agrária (PNATER) e o Programa Nacional de Assistência Técnica e Extensão Rural na Agricultura Familiar e na Reforma Agrária (PRONATER).

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 28 maio 2012.

BRASIL. **Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021**. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 14 jan. 2021.

BREDA, V. S. M. M.; FERRARI, J. L.; AMARAL, A. A. do; SOUZA, M. N. de; ANASTÁCIO, A. dos S. Uso e ocupação do solo no córrego Horizonte, Rive, Alegre-ES. **Espaço em Revista**, v. 28, e2026001, 2026. DOI: 10.70261/er.v28i1.e2026001.

BROOKER, R. W.; MAESTRE, F. T.; CALLAWAY, R. M.; LORTIE, C. J.; CAVIERES, L. A.; KUNSTLER, G.; LIANCOURT, P.; TIELBÖRGER, K.; TRAVIS, J. M. J.; ANTHELME, F.; ARMAS, C.; COLL, L.; CORCKET, E.; DELZON, S.; FOREY, E.; KIKVIDZE, Z.; OLOFSSON, J.; PUGNAIRE, F. I.; QUIROZ, C. L.; SACHS, T.; SCHIFFERS, K.; SEIFAN, M.; TOUZARD, B.; MICHALET, R. Facilitation in plant communities: the past, the present, and the future. **Journal of Ecology**, London, v. 96, n. 1, p. 18-34, 2008.

CALABIANQUI, T. N.; FERRARI, J. L.; SANTOS, A. R.; OLIVEIRA, A. F. M.; SOUZA, M. N. **Atlas [recurso eletrônico]: mapeamento e zoneamento agrícola de risco climático para a cafeicultura nos assentamentos rurais da microrregião do Caparaó, ES**, ed.1. Vitória: Edifes, 2025, v. I., 142 p. ISBN: 9786553310681. Home page: <https://repositorio.ifes.edu.br/>

CALLAWAY, R. M. Positive interactions among plants. **The Botanical Review**, New York, v. 61, n. 4, p. 306-349, 1995.

CALLAWAY, R. M. **Positive interactions and interdependence in plant communities**. Dordrecht: Springer, 2007.

CAPORAL, F. R.; COSTABEBER, J. A. **Agroecologia e extensão rural: contribuições para a promoção do desenvolvimento rural sustentável**. Brasília, DF: MDA/SAF, 2004.

CAPORAL, F. R.; COSTABEBER, J. A. **Agroecologia: alguns conceitos e princípios**. Brasília: MDA/SAF, 2004.

CAPRA, F. **A teia da vida: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos**. São Paulo: Cultrix, 1996.

CARSON, R. **Primavera silenciosa**. São Paulo: Gaia, 2010.

CARSON, R. **Silent spring**. Boston: Houghton Mifflin, 1962. 368 p.

CARVALHO, S. W. S. de; HENRIQUE, E. P.; FIGUEIREDO, J. S. M.; SOUZA, M. N.; SARDINHA, M. P. R.; PEIXOTO, P. M. C.; FONSECA, T. S. da; LOUBACK, G. C.; MAGALHÃES, M. V. D. de; CARVALHO, S. L. Desigualdade social, saneamento básico, impactos e externalidades ambientais: agroecologia, “Agenda 2030” e sustentabilidade nos sistemas produtivos. p. . In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas**. Vol. II. Canoas: Mérida Publishers Ltda. 2021. p. 349-377. <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-994457-2-9.c10>

CASTRO, L. A.; VALDEZ, M. R.; SILVA, J. P.; MENDES, F. A. Carbon farming in coffee agroforestry systems: economic viability and market opportunities for smallholders. **Ecological Economics**, v. 216, 108023, p. 1-14, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.108023>.

CHARBONNIER, F.; ROUPSARD, O.; LE MAIRE, G.; GUILLEMOT, J.; CASANOVES, F.; LACOINTE, A.; VAAST, P.; ALLINNE, C.; AUDEBERT, L.; CAMBOU, A.; CLÉMENT-VIDAL, A.; DEFRENET, E.; DUURSMA, R. A.; JARRI, L.; JOURDAN, C.; KHAC, E.; LEANDRO, P.; MEDLYN, B. E.; SAINT-ANDRÉ, L.; THALER, P.; VAN DEN MEERSCHKE, K.; BARQUERO AGUILAR, A.; LEHNER, P.; DREYER, E. Increased light-use efficiency sustains net primary productivity of shaded coffee plants in agroforestry system. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 40, n. 8, p. 1592–1608, 2017. DOI: 10.1111/pce.12964.

CLEMENTS, F. E. **Plant succession**: an analysis of the development of vegetation. Washington: Carnegie Institution of Washington, 1916.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira**: café. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cafe/4o-levantamento-de-cafe-safra-2024/boletim-cafe-janeiro-2025>. Acesso em: 12 jun. 2025.

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.

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.

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**, Londrina, v. 18, n. 1, p. 55-81, 2006.

DO CAPARAÓ. **Origem comprovada e qualidade certificada**. 2025. Disponível em: <https://caparao.org.br/do/>. Acesso em: 12 jun. 2025.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W. et al. (ed.). Defining soil quality for a sustainable environment. Madison: **Soil Science Society of America**, 1994. p. 3-21. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>.

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: 10.21664/2238-8869.2025v14i3.7988.

EMBRAPA CAFÉ. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Cafeicultura de precisão: conceitos e aplicações**. Brasília: Embrapa Café, 2023.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Pesquisa recomenda ações para reduzir efeitos do excesso de calor nas plantas**. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/85220729/pesquisa-recomenda-acoes-para-reduzir-efeitos-do-excesso-de-calor-nas-plantas>. Acesso em: 12 jun. 2025.

ESPÍRITO SANTO. Secretaria de Estado da Agricultura, Abastecimento, Aquicultura e Pesca. **Programa Reflorestar: relatório de resultados**. Vitória: SEAG, 2023.

FAIRTRADE INTERNATIONAL. **Annual Report 2023**. Bonn: Fairtrade International, 2023.

FAIRTRADE INTERNATIONAL. **Fairtrade Standard for Coffee for Small Producer Organizations**. Version 1.5. Bonn: Fairtrade International, 2023.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The State of Food and Agriculture 2023: Revealing the true cost of food to transform agrifood systems**. Rome: FAO, 2023. DOI: 10.4060/cc7724en.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The future of food and agriculture: drivers and triggers for transformation**. Rome: FAO, 2022.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The future of food and agriculture: trends and challenges**. Rome, 2017. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf>. Acesso em: 25 out. 2025.

FAO. Food and Agriculture Organization. **The state of food security and nutrition in the world**. Rome: FAO, 2018.

FAO. Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. **World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision**. Roma: FAO, 2012. Disponível em: <https://www.fao.org/3/ap106e/ap106e.pdf>. Acesso em: 16 maio 2026.

FAO. Food and Agriculture Organization. **The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at Breaking Point**. Rome: FAO, 2021.

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, I. L. C.; VEIGA, J. B. da; CHAVES, S. de F. do N.; ROMEIRO, S. A. **Sistemas agroflorestais pecuários: o uso de espécies arbóreas como alternativa para o redesenho da paisagem rural e reabilitação de pastagens degradadas em São Domingos do Araguaia-PA**. 2020.

FERRÃO, R. G.; FONSECA, A. F. A. da; FERRÃO, M. A. G.; MUNER, L. H. de. (Ed.). **Café conilon**. 2. ed. rev. e atual. Vitória, ES: Incaper, 2017. 702 p.

FORMAN, R. T. T.; GODRON, M. **Landscape ecology**. New York: John Wiley & Sons, 1986.

GARIBALDI, L. A.; STEFFAN-DEWENTER, I.; WINFREE, R. Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey bee abundance. **Science**, Washington, v. 339, n. 6127, p. 1608-1611, 2013. DOI: 10.1126/science.1230200.

GAUSE, G. F. **The struggle for existence**. Baltimore: Williams & Wilkins, 1934. 163 p.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009. 653p.

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

GLIESSMAN, S. R. **Agroecology: the ecology of sustainable food systems**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2021.

GOMES, A. L. C.; SOUZA, M. N.; FERRARI, J. L.; PELUZIO, J. B. E.; PELUZIO, T. M. O. Utilização de flora ruderal e PANC como plantas apícolas em consórcio com espécies do gênero *Coffea*. In: PELUZIO, J. B. E.; SIMÃO, J. B. P.; PELUZIO, T. M. O.; LIMA, M. S. P.; LOPES, A. C.; FERBEK, G. J. V.; MARTINS, N. H. G. (org.).

A cafeicultura do Caparaó: resultado de pesquisas VIII. Vitória: Edifes, 2025. p. 12-26.

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.

GÖTSCH, E. **Break-through in agriculture.** Piraí do Norte: Agenda Götsch, 1995.

GURR, G. M.; WRATTEN, S. D.; SNYDER, W. E. **Biodiversity and Insect Pests: Key Issues for Sustainable Management.** Chichester: Wiley-Blackwell, 2012.

HARVEY, C. A., KOMAR, O., CHAZDON, R., FERGUSON, B. G., FINEGAN, B., GRIFFITH, D. M., MARTÍNEZ-RAMOS, M., MORALES, H., NIGH, R., SOTO-PINTO, L., VAN BREUGEL, M.; WISHNIE, M. Integrating Agricultural Landscapes with Biodiversity Conservation in the Mesoamerican Hotspot. **Conservation Biology**, v. 22, n. 1, p. 8-15, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2007.00863.x>.

HLPE. High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition. **Nutrition and food systems.** Rome: High level panel of experts on food security and nutrition, 2017.

HOLLING, C. S. Resilience and stability of ecological systems. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 4, n. 1, p. 1-23, 1973.

HUANG, Y.; REN, W.; GROVE, J.; POFFENBARGER, H.; JACOBSEN, K.; TAO, B.; ZHU, X.; MCNEAR, D. Assessing synergistic effects of no-tillage and cover crops on soil carbon dynamics in a long-term maize cropping system under climate change. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 291, p. 108090, 2020. DOI: [10.1016/j.agrformet.2020.108090](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108090).

HUNTER, M. C.; SMITH, R. G.; JORDAN, N. R.; WEAVER, D. A.; MITCHELL, P. D.; WIEDERHOLT, R. J. Agriculture in 2050: Recalibrating Targets for Sustainable Intensification. **BioScience**, v. 67, n. 4, p. 386-391, abr. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1093/biosci/bix010>.

HUTCHINSON, G. E. The paradox of the plankton. **The American Naturalist**, v. 95, n. 882, p. 137-145, 1961.

INCAPER. Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. **Cafeicultura.** Vitória, 2025. Disponível em: <https://incaper.es.gov.br/cafeicultura>. Acesso em: 14 abr. 2025.

INPI. Instituto Nacional da Propriedade Industrial. **Denominação de Origem Caparaó para café.** Rio de Janeiro: INPI, 2021.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023.

JONES, K. Assessing the impact of voluntary certification schemes for sustainable coffee production: a review. **Sustainability**, v. 16, n. 13, p. 5669, 2024.

JOSE, S. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. **Agroforestry Systems**, v. 76, p. 1–10, 2009.

LAL, R. Soil organic matter content and crop yield. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 75, n. 2, p. 27A-32A, 2020. DOI: 10.2489/jswc.75.2.27A.

LAL, R.; SMITH, P.; SMITH, J. U.; MCDONALD, A. J.; COOTE, D. R. Soil processes and the carbon cycle. In: LAL, R. (ed.). **Soil and Climate**. Boca Raton: CRC Press, 2018. p. 245-266.

LAMAS, B. N.; SILVA, M. F. da; FERRARI, J. L.; PELUZIO, J. B. E.; SOUZA, M. N.; PELUZIO, T. M. de O. Análise da variabilidade espacial do relevo e de características agronômicas em lavoura de café arábica no Sítio Caiamba, região do Caparaó, Espírito Santo. In: PELUZIO, J. B. E. *et al.* (Org.). **A cafeicultura do Caparaó: resultado de pesquisas VIII**. Alegre, ES, 2025. p. 71-93.

LAVELLE, P. et al. Soil invertebrates and ecosystem services. **European Journal of Soil Biology**, Montrouge, v. 42, p. S3-S15, 2006.

LEFF, E. **Epistemologia ambiental**. São Paulo: Cortez, 2002.

LIMA, O. A.; RELVAS, R. M. S.; SILVA, E. P.; ARAUJO, O. P.; SOUZA, M. N.; SILVA, I. S.; PAUTZ, C.; CARNEIRO, A. S.; MOUTINHO-FILHO, M. D.; SANTOS, M. F. C.; SOUZA, M. S. Fruit development and maturation in clones of *Coffea canephora* implanted in south Amazonas. **Brazilian Journal of Biology** (ONLINE). v. 85, p. 1-14, 2025. Home page: [<https://www.scielo.br/j/bjb/a/9rjtKtzzctVwgYcxkTjsX7n/?lang=en>][doi:10.1590/1519-6984.299488].

LIMA, R. G.; MARTINS, E. de O.; TAVARES, L. R.; RANGEL, D. S.; LOUBACK, G. R.; TRUGILHO G. A.; SILVA, M. B. A. da; XAVIER, S. B. A.; PERON, I. B.; VARDIERO, L. G. G.; GOMES, A. L. C.; SOUZA, M. N. Sistemas Agroflorestais em Áreas de Preservação Permanente. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas**. Vol. III. – Canoas, RS: Mérida Publishers. p. 270-298. 2022. <http://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-04-6.c9>

LIMA, R. G.; MARTINS, E. de O.; TAVARES, L. R.; RANGEL, D. S.; LOUBACK, G. R.; TRUGILHO G. A.; SILVA, M. B. A. da; XAVIER, S. B. A.; PERON, I. B.; VARDIERO, L. G. G.; GOMES, A. L. C.; SOUZA, M. N. Sistemas Agroflorestais em Áreas de Preservação Permanente. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas**. Vol. III. – Canoas, RS: Mérida Publishers. p. 270-298. 2022. DOI: <http://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-04-6.c9>.

LIN, B. B. Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 144, n. 1-2, p. 85-94, 2007.

LOREAU, M. **From populations to ecosystems: theoretical foundations for a new ecological synthesis**. Princeton: Princeton University Press, 2010.

LUNZ, A. M. P. **Crescimento e produtividade do cafeeiro sombreado e a pleno sol**. 2006. 94 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

MACARTHUR, R. H. **Geographical Ecology: patterns in the distribution of species**. Princeton: Princeton University Press, 1972. 269 p.

MACARTHUR, R. H.; LEVINS, R. The limiting similarity, convergence, and divergence of coexisting species. **The American Naturalist**, Chicago, v. 101, n. 921, p. 377-385, 1967.

MACHADO, A. H. R.; FERRÃO, R. G.; FONSECA, A. F. A. da; FERRÃO, M. A. G.; SOUZA, J. L. de; PREZOTTI, L. C.; VOLPI, P. S.; ROCHA, R. B. A cultura do café (*Coffea arabica*) em sistema agroflorestal. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, Curitiba, v. 3, n. 3, p. 1357-1369, 2020.

MALAQUIAS, J. O. da S.; MARIANO, S. R.; GONÇALVES, J. M.; LOUBACK, G. C.; MENDONÇA, R. L. de P. D.; OLIVEIRA, S. R. dos S. M. de; EGIDIO, L. S.; VIEIRA, R. C.; CRESPO, A. M.; SOUZA, M. N. Degradação ambiental pelo fator antrópico e formas de mitigação: uma breve análise da agropecuária e seus impactos no meio ambiente. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em gestão ambiental. Vol. I**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2024. p. 34-66. ISBN: 978-65-84548-22-0. DOI: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-22-0.c1>.

MARQUES, J. A.; OLIVEIRA, C. H. R. de; PELÚZIO, J. B. E.; OLIVEIRA, F. B. de; CALDEIRA, M. V. W.; GONÇALVES, E. de O.; MOURA, C. C. de; GOMES, G. S. L.; SENRA, L. de B.; MENDONÇA, G. S.; ALMEIDA, M. W. C. de; SOUZA, M. N.; RAMOS, L. S. Control-release fertilizer improves growth and quality of *Cedrela fissilis* seedlings in nursery production. **Forests**, Basel, v. 17, p. 789, 2026. DOI: 10.3390/f17070789.

MARTINELLI, G. C. **Sistemas agroflorestais biodiversos: uma análise sob a perspectiva ambiental e econômica**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Administração, Ciências Contábeis e Economia, 2018.

MARTINELLI, L. A.; JOLY, C. A.; NOBRE, C. A.; SPAROVEK, G. The challenge of mapping and monitoring Brazilian agricultural landscapes. **Anais... Academia Brasileira de Ciências**, v. 92, supl. 2, e20190804, 2020.

MARTINS, E. de O.; TRUGILHO, G. A.; SILVA, M. B. de A.; SOUZA, M. N. Recuperação de áreas degradadas da cafeicultura sob manejo de sistema agroflorestal. In: SOUZA, M. N. (Org.). **Tópicos em recuperação de áreas degradadas. Vol. III**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2022. p. 137-157. DOI: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-04-6.c4>.

MARTINS, S. V.; SOUZA, M. N. **Cultivo do Palmiteiro-Juçara (*Euterpe Edulis* Mart.)**: produção de palmito e restauração florestal. Viçosa: Aprenda Fácil, 2009, v.3000. 107p.

MATOS, M. S. **Estudos da fertilidade do solo em áreas cultivadas com culturas anuais em comparação com a mata nativa**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso.

MAY, R. M. **Stability and complexity in model ecosystems**. Princeton: Princeton University Press, 1973. 235 p.

MEA. Millennium Ecosystem Assessment. **Ecosystems and Human Well-being: Synthesis**. Washington, DC: Island Press, 2005.

MENDONÇA, R. L. P. D.; ARRUDA, L. F. L.; PENNA JÚNIOR, C. O.; SOUZA, M. N. Viabilidade econômica de sistemas agroflorestais com café arábica na microrregião Caparaó Capixaba, sul do estado do Espírito Santo. **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v. 15, p. 163-191, 2026. DOI: <https://doi.org/10.21664/2238-8869.2026v15i1.8364>.

MENEZES, R. S. C.; SALES, A. T.; PRIMO, D. C.; ALBUQUERQUE, E. R. G. M.; JESUS, K. N.; PAREYN, F. G. C.; SANTANA, M. S.; SANTOS, U. J.; MARTINS, J. C. R.; ALTHOFF, T. D.; NASCIMENTO, D. M.; GOUVEIA, R. F.; FERNANDES, M. M.; LOUREIRO, D. C.; ARAÚJO FILHO, J. C.; GIONGO, V.; DUDA, G. P.; ALVES, B. J. R.; IVO, W. M. P. M.; ANDRADE, E. M.; PINTO, A. S.; SAMPAIO, E. V. S. B. Soil and vegetation carbon stocks after land-use changes in a seasonally dry tropical forest. **Geoderma**, [S. l.], v. 390, p. 114943, 2021. DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.114943.

MICCOLIS, A.; PENEIREIRO, F. M.; MARQUES, H. R.; VIEIRA, D. L. M.; ARCOVERDE, M. F.; HOFFMANN, M. R.; REHDER, T.; PEREIRA, A. V. B. **Restauração ecológica com sistemas agroflorestais: como conciliar conservação com produção**. Brasília: Instituto Sociedade, População e Natureza; Centro Internacional de Pesquisa Agroflorestal, 2016.

MICONI, B. P.; PIÑA-RODRIGUES, F. C. M.; SOUZA, M. C. de; FIGUEIREDO, J. R. de. Dinâmica sucessional e aporte de biomassa em sistemas agroflorestais direcionados pela sucessão natural. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 15, n. 2, p. 45-58, 2020.

MOKONDOKO, P.; LEÓN, S.; TCHIENKOUA, M.; CLERCK, F. de; JHA, S. Biophysical drivers of yield gaps and ecosystem services across different coffee-based agroforestry management types: a global meta-analysis. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 199, art. 103409, 2022. DOI: 10.1016/j.agsy.2022.103409.

MONTAGNINI, F.; NAIR, P. K. R. Carbon sequestration: an underexploited environmental benefit of agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 61-62, p. 281-295, 2004.

NAIR, P. K. R. Agroforestry systems and environmental quality: introduction. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 40, n. 3, p. 784-790, 2011.

NAIR, P. K. R. **An introduction to agroforestry**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993. 499p.

NAIR, P. K. R.; KUMAR, B. M.; NAIR, V. D. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 172, n. 1, p. 10-23, 2009.

NAIR, P. K. R.; KUMAR, B. M.; NAIR, V. D. Carbon sequestration in agroforestry systems: a state-of-the-art review. **Agronomy**, v. 11, n. 5, 944, p. 1-27, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11050944>.

NEVES, J. J. M. das; LOPES, L. B.; ANDRADE, J. S. de; SOUZA, J. T. de; COSTA, W. M. da; AMARAL, A. A. do; SOUZA, M. N. Integração de estratégias sustentáveis: Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e Sistemas Agroflorestais (SAFs) como alternativas ao enfrentamento da degradação ambiental. In: SOUZA, M. N. (org.). **Tópicos em Gestão Ambiental: v. 5**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026. p. 131-174. ISBN 978-65-84548-45-9. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-45-9.c4>.

NUNES, J. V. O.; LIMA, G. C. de; PEREIRA, M. G.; SILVA, E. M. da; CHAVES, M. M. Ciclagem de nutrientes e qualidade do solo em sistemas agroflorestais cafeeiros sob manejo ecológico. **Bragantia**, v. 81, e0822, p. 1-12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20210192>.

ODUM, E. P. **Fundamentals of ecology**. 3. ed. Philadelphia: W. B. Saunders Company, 1971. 574p.

ODUM, E. P.; BARRETT, G. W. **Fundamentos de ecologia**. 5. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007. 612p.

ODUM, E. P.; BARRETT, G. W. **Fundamentos de ecologia**. 6. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2020.

ODUM, H. T. Self-organization, transformity and information. **Science**, Washington, v. 242, n. 4882, p. 1132-1139, 1988.

PADOVAN, M. P.; ARAÚJO, J. B. S.; SIQUEIRA, H. M.; SALES, E. F. (org.). **Café sombreado: uma abordagem multidisciplinar**. Vitória: Incaper, 2024.

PEREIRA, R. G.; BORGES, M. A.; SILVA, F. A.; SOUZA, J. L.; MEDEIROS, L. R. Natural biological control of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) in agroforestry vs. monoculture systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 326, 107812, p. 1-10, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107812>.

PERFECTO, I.; VANDERMEER, J. The agroecological matrix as alternative to the land-sparing/agriculture intensification model. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 13, p. 5786-5791, 2010.

PEZZOPANE, J. R. M.; MARRE, W. B.; BORGES, W. L.; SOUZA, J. M. de; JUNIOR, W. C. J. Microclima em sistema agroflorestal com café conilon e cedro-australiano. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 11, p. 1257-1264, 2010.

PINHEIRO, A. C. M.; SOUZA, M. N.; PERON, I. B.; LOUBACK, G. C.; SILVA, M. A. P. da; CASSA, N. Manejo integrado de pragas e doenças no controle do bicho-

mineiro (*Leucoptera coffeella*). In: VIEIRA, L. H. S.; VARNIER, E. et al. (org.). **Coletânea Multicampi de trabalhos em Pesquisa, Extensão e Ensino**: IFES Alegre, Itapina e Santa Teresa. Curitiba: CRV, 2024. p. 78-90. DOI: <https://doi.org/10.24824/978652515795.5>.

PRIMAVESI, A. **Alguns manejos ecológicos de solos de regiões tropicais**. São Paulo: Expressão Popular, 2017.

PROGRAMA REFLORESTAR. **Programa Reflorestar**. Vitória, 2025. Disponível em: <https://www.es.gov.br/programa-reflorestar>. Acesso em: 12 jun. 2025.

PRONTI, A.; COCCIA, M. Multicriteria analysis of the sustainability performance between agroecological and conventional coffee farms in the East Region of Minas Gerais (Brazil). **Renewable Agriculture and Food Systems**, [s. l.], p. 1-8, 2020.

RAINFOREST ALLIANCE. **Rainforest Alliance Certification Program**. New York: Rainforest Alliance, 2023.

RAINFOREST ALLIANCE. **Sustainable Agriculture Standard: Farm Requirements**. Version 1.3. New York: Rainforest Alliance, 2023.

REFLORESTAR ES. **Programa Reflorestar**. Vitória: Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 2023.

REZENDE, J. L. P. de; OLIVEIRA, A. D. **Análise econômica e social de projetos florestais**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2013.

REZENDE, M. Q.; SANZ-VEIGA, A.; VENZON, M.; PALLINI, A. Nectários extraflorais e formigas: uma estratégia de controle biológico na cafeicultura. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 35, n. 279, p. 45-53, 2014.

RICHARDS, P. W. **The tropical rain forest: an ecological study**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

RODRIGUES, P. D.; SOUZA, M. N. Análise da viabilidade econômica de sistemas agroflorestais em áreas do Programa Reflorestar no Espírito Santo. In: SOUZA, M. N. (org.) **Tópicos em gestão ambiental. Vol. IV**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. p. 128-148. ISBN: 978-65-84548-36-7. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-36-7>.

RODRIGUES, R. P.; SOUZA, J. L. de; PINHEIRO, A. P. B.; SANTOS, S. A. dos. Três gerações de sistemas agroflorestais como fonte de geração de renda e segurança alimentar para a agricultura familiar. **Cadernos de Agroecologia**, v. 15, n. 2, 2020.

SAATH, K. C. O.; FACHINELLO, A. L. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 56, p. 195-212, 2018.

SABOURIN, E. **Camponeses do Brasil: entre a troca mercantil e a reciprocidade**. Rio de Janeiro: Garamond, 2009.

SACHS, I. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. 3. ed. Rio de Janeiro: Garamond, 2008.

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>.

SANTOS, F. L. de S.; RAMALHO, L. de S.; MARQUES, T. de A.; SENA-SOUZA, J. P.; REATTO, A.; MARTINS, E. de S.; COUTO JUNIOR, A. F.; NARDOTO, G. B. Relação entre o carbono orgânico do solo e o índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI) para áreas de cerrado sentido restrito da bacia do córrego do Sarandi, região de Cerrado do Brasil Central. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 5285-5292.

SCHNEIDER, M.; ANDRES, C.; TRUJILLO, G.; ALCON, F.; AMURRIO, P.; PEREZ, E.; WEIBEL, F.; MILZ, J. Cacau e rendimentos do sistema total da agrofloresta orgânica e convencional vs. sistemas de monocultura em um ensaio de campo de longo prazo na Bolívia. **Agricultura Experimental**, [s. l.], v. 53, n. 3, p. 351-374, 2016.

SCHROTH, G.; FONSECA, G. A. B. da; HARVEY, C. A.; GASCON, C.; VASCONCELOS, H. L.; IZAC, A.-M. N. (ed.). **Agroforestry and biodiversity conservation in tropical landscapes**. Washington, DC: Island Press, 2004. 523 p.

SCHULER, H. R.; ALARCON, G. G.; JONER, F.; DOS SANTOS, K. L.; SIMINSKI, A.; SIDDIQUE, I. Ecosystem Services from Ecological Agroforestry in Brazil: A Systematic Map of Scientific Evidence. **Land**, Basel, v. 11, n. 1, art. 83, 2022. DOI: [10.3390/land11010083](https://doi.org/10.3390/land11010083).

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

SILVA, J. M. V. de O. da; SOUZA, M. N.; RANGEL, O. J. P.; FORNAZIER, M. L.; LOUBACK, G. R.; PIROVANI, G.; CAON, B. L.; MOREIRA, M. F.; SIQUEIRA, C. B.; TRUGILHO, G. A.; KAULZ, M.; CRESPO, A. M.; GOMES, A. L. C.; GALL, M. V. C.; PINHEIRO, A. C. M.; GUERRA, A. C. M.; PERON, I. B. Sistemas agroflorestais e consórcios na cultura do café. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas. Vol. IV.** – Canoas, RS: Mérida Publishers. p. 172-201. 2022. DOI: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-10-7.c6>

SILVA, J. M. V. O.; SOUZA, M. N. **Produção de café orgânico: práticas agroecológicas conservacionistas e novas tecnologias disponíveis ao produtor rural**. Novas Edições Acadêmicas: Beau Bassin, Mauritius, 2021. 72p. ISBN: 978-620-2-80825-2.

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, J. M. V. O.; SOUZA, M. N.; RANGEL, O. J. P.; LOPES, J. F.; FORNAZIER, M. L. Cafeicultura agroecológica: sugestões para pesquisa. In: 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, Mauricius: Novas Edições Acadêmicas, 2021, v.1, p. 51-64.

SÍTIO RELÍQUIA DO CAPARAÓ. **Instagram: @sitioreliquiadocaparao**. Disponível em: <https://www.instagram.com/sitioreliquiadocaparao/>. Acesso em: 30 mar. 2026.

SOUSA, A. B. *et al.* **Sistemas Agroflorestais cafeeiros: diversificação produtiva e desenvolvimento territorial**. 2025.

SOUSA, D. S. M. de; MEDEIROS, G. dos S.; SOUZA, M. N.; SOUZA, C. de O.; RANGEL, O. J. P.; PINTO, G. P.; OLIVEIRA, C. H. R. de; XAVIER, S. A. B. Adoção de SAFs: um modelo eficiente para a recuperação ecológica e geração de renda. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas. Vol. IX**. – Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. p. 291-317. ISBN: 978-65-84548-33-6. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-33-6.c10>

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, C. de O.; SILVA, M. A. B. da; SOUZA, M. N.; RANGEL, O. J. P. Importância das árvores nos sistemas agroflorestais. In: RANGEL, O. J. P. *et al.* (org.). **Tópicos em agroecologia: volume V**. Vitória: Edifes Acadêmico, 2026. p. 103-115. 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, F. P.; CASTILHO, T. P. R. Uso de sistemas agroflorestais para o controle biológico natural em propriedades rurais. **Scientific Electronic Archives**, v. 15, n. 7, 2022.

SOUZA, G. S.; ALVES, D. I.; DAN, M. Soil physico-hydraulic properties under organic conilon coffee intercropped with tree and fruit species. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 12, p. 1115-1124, 2017.

SOUZA, H. A.; LEITE, L. F.; MEDEIROS, J. C. (Ed.). **Solos sustentáveis para a agricultura no Nordeste**. Brasília: Embrapa, 2021. p. 25-54.

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,

2026e. 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. Desafios e obstáculos da agroecologia. In: SOUZA, M. N. **Agroecologia: a sustentabilidade verde - da agricultura convencional à transformação agroecológica**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026b. p. 142-156. ISBN: 978-65-84548-44-2. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-44-2.c9>.

SOUZA, M. N. Direções futuras para a agroecologia. In: SOUZA, M. N. **Agroecologia: a sustentabilidade verde - da agricultura convencional à transformação agroecológica**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026c. p. 157-168. ISBN: 978-65-84548-44-2. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-44-2.c10>.

SOUZA, M. N. Estudos de caso em agroecologia. In: SOUZA, M. N. **Agroecologia: a sustentabilidade verde - da agricultura convencional à transformação agroecológica**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026a. p. 131-141. ISBN: 978-65-84548-44-2. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-44-2.c8>.

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: vol. 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, 2025c. p. 68-111. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-34-3.c2>.

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 scnery of climatic change. **Cadernos UNICAMP**, v.84, p.67-79, 2012.

SOUZA, M. N.; RIBEIRO, R. A. V.; VIEIRA, R. C.; SILVA, K. F. da; SILVA, M. A. P. da; PINHEIRO, A. C. M.; CRESPO, A. M.; LOUBACK, G. C. Externalidades e impactos ambientais negativos: fator antrópico, capital natural e práticas agroecológicas mitigadoras. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas. Vol. VII**. – Canoas, RS: Mérida Publishers, 2023. p. 88-127. ISBN: 978-65-84548-18-3. DOI: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-18-3.c3>.

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

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>.

TADINI, A. M.; MARTIN-NETO, L.; GORANOV, A. I.; MILORI, D. M. B. P.; BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; COLNAGO, L. A.; HATCHER, P. G. Chemical characteristics of soil organic matter from integrated agricultural systems in southeastern Brazil. **European Journal of Soil Science**, [S. l.], v. 73, e13136, 2021. DOI: 10.1111/ejss.13136.

TILMAN, D.; ISBELL, F.; COWLES, J. M. Biodiversity and ecosystem functioning. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, Palo Alto, v. 45, p. 471-493, 2014.

TRUGILHO, G. A.; MOREIRA, C. G.; MOURA NETO, H.; CARVALHO, C. S.; RANGEL, D. S.; SOUZA, M. N.; SOUZA, M. A. A. S. Pagamento por serviços ambientais: conceitos, histórico e o estudo de caso do Estado do Espírito Santo. In: **Tópicos em Agroecologia vol. III**. 1 ed. VITÓRIA: Edifes, 2022, v.3, p. 66-86.

TSCHARNTKE, T.; CLOUGH, Y.; BHAGWAT, S. A.; DAVID, T.; DRENKHAN, E.; DUGUMA, P. F.; FRISCH, M.; PADOOM, A. Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes: a review. **Journal of Applied Ecology**, v. 48, n. 3, p. 619-629, 2011.

VAN NOORDWIJK, M.; DUGUMA, L. A.; DEWI, S.; LEIMONA, B.; CATACUTAN, D. C.; LUSIANA, B.; ÖBORN, I.; HAIRIAH, K.; MINANG, P. A.; EKADINATA, A.; MARTINI, E.; DEGRANDE, A.; PRABHU, R. Agroforestry into its fifth decade: local responses to global challenges and goals in the Anthropocene. In: VAN NOORDWIJK, M. (ed.). **Sustainable development through trees on farms: agroforestry in its fifth decade**. Bogor, Indonesia: World Agroforestry (ICRAF), 2019. p. 405-428.

VARDIERO, L. G. G.; PEREIRA, L. L.; SOUZA, M. N.; ALVES, E. A.; BERILLI, A. P. C. G. Do conceito de “TERROIR” para a prática da indicação geográfica: uma revisão sistemática. p. 56-81. In: SOUZA, M. N.; SIMÃO, J. B. **Tópicos em cafeicultura: cafés especiais. Vol. IV**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2024. 258 p. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-28-8>

VENZON, M.; PALLINI, A.; NEVES, W. S.; PAULA JÚNIOR, T. J.; BETTIOL, W.; VILELA, E. F. Inovações para o manejo sustentável de pragas e doenças. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 40, n. 305, p. 7-12, 2019.

VIEIRA, R. C.; ALMEIDA, M. W. C. de; TRUGILHO, G. A.; EGIDIO, L. S.; SOUZA, M. N. Avaliação das contribuições do programa REFLORESTAR em propriedades rurais localizadas no município de Muniz Freire/ES. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em gestão ambiental vol. II**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2024. p. 152-172. ISBN: 978-65-84548-23-7. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-23-7.c5>.

WALKER, B. Biodiversity and ecological redundancy. **Conservation Biology**, Boston, v. 6, n. 1, p. 18-23, 1992.

WEZEL, A.; GEMMILL HERREN, B.; BEZNER KERR, R.; BARRIOS, E.; GONÇALVES, A. L. R.; SINCLAIR, F. Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, Versailles, v. 40, art. 40, 2020. DOI: 10.1007/s13593-020-00646-z.

YANG, Y.; XIONG, K.; XIAO, J. A review of agroforestry biodiversity-driven provision of ecosystem services and implications for karst desertification control. **Ecosystem Services**, Amsterdam, v. 67, art. 101634, 2024. DOI: 10.1016/j.ecoser.2024.101634.

YILMAZ, H.; YILMAZ, A. Fome Oculta na Era da Abundância: As Armadilhas Nutricionais das Culturas Básicas Modernas. **Ciência dos Alimentos e Nutrição**, [s. l.], v. 13, 2025.

YOUNG, A. **Agroforestry for soil management**. 2. ed. Wallingford: CAB International, 1997.



www.meridapublishers.com