

ORGANIZADOR:
Maurício Novaes Souza

Tópicos em Gestão Ambiental

Volume 5



M
MÉRIDA
PUBLISHERS

ORGANIZADOR:
Maurício Novaes Souza

Tópicos em
Gestão
Ambiental
Volume 5

Canoas
2026



Equipe editorial

Editor Chefe

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

Comitê Editorial

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ESTUDOS DE CASO:

Gestão ambiental e as dimensões da sustentabilidade agroecológica

Defesa vegetal em sistemas agroecológicos: fundamentos fisiológicos, microbiológicos e interações ecológicas

Sistemas de produção integrados como estratégia para o conforto térmico e a sustentabilidade na bovinocultura leiteira

Integração de estratégias sustentáveis: Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e Sistemas Agroflorestais (SAFs) como alternativas ao enfrentamento da degradação ambiental

Uso de resíduos orgânicos na formulação de substratos para a produção de mudas de espécies florestais nativas da Mata Atlântica

Potencial de óleos essenciais no controle de *Colletotrichum* em pós-colheita

Incidência de *Streptococcus agalactiae* e estratégias de controle sanitário na tilapicultura: diagnósticos e perspectivas para o sul do Espírito Santo

Qualidade físico-química e microbiológica da água em bebedouro e poço artesiano em Alegre–ES: uma análise comparativa

Levantamento de indicadores econômicos e de contratos municipais de serviços de limpeza urbana do estado do Espírito Santo

Educação inclusiva e agroecologia: construindo caminhos de acessibilidade metodológica no ensino de ciências da natureza

Tópicos em Gestão Ambiental Volume V

© 2026 Mérida Publishers

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-45-9>

Organizador

Maurício Novaes Souza

Revisão ortográfica

Maurício Novaes Souza

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 gestão ambiental [livro eletrônico] : Vol. V / organização de Maurício Novaes Souza. – 1. ed. – Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026.

Formato: ePUB

Requisitos de sistema: Adobe Digital Editions

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia.

ISBN 978-65-84548-45-9

1. Gestão ambiental – Estudos. 2. Meio ambiente – Desenvolvimento sustentável. 3. Políticas ambientais – Brasil. 4. Sustentabilidade – Perspectivas contemporâneas. I. Souza, Maurício Novaes.

CDD 363.7

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

Dedicatória

Em fevereiro de 2016, iniciei minha trajetória no Ifes Campus de Alegre. Depois de muitos anos longe do meu Estado, retornei para viver em Guarapari, lugar que escolhi para habitar não apenas como residência, mas como espaço de recomeço.

Este livro, *Tópicos em Gestão Ambiental Volume V*, marca minha TRIGÉSIMA publicação no âmbito do PPGA do Ifes Campus de Alegre. Mais do que um número, ele representa um percurso tecido por encontros, aprendizados e construções coletivas. Por isso, dedico esta obra a todos que caminharam comigo ao longo dessa jornada.

Aos alunos da pós-graduação *lato sensu*, do mestrado e do doutorado *stricto sensu* em Agroecologia; aos estudantes da Tecnologia em Cafeicultura e da Agronomia; aos colegas de trabalho que, de diferentes formas, contribuíram para a construção destes livros; à minha família, presença constante de incentivo, expresso minha sincera gratidão.

De modo especial, registro meu reconhecimento ao Prof. Otacílio José Passos Rangel. Durante muito tempo, alimentei o desejo de organizar publicações coletivas com alunos: um projeto adiado por circunstâncias diversas. Foi no Ifes, ao conhecer a série *Tópicos em Agroecologia Volume I*, que essa intenção encontrou terreno fértil e se transformou em realidade. Desde então, passei a integrar o grupo de organizadores dessa iniciativa, que tanto me inspira.

Ao longo desses 8 anos no PPGA, foram produzidos 10 volumes da série *Tópicos em Recuperação de Áreas Degradadas*; 5 de *Tópicos em Cafeicultura*; 5 de *Tópicos em Gestão Ambiental*; e 4 de *Tópicos em Agroecologia*. Somam-se a esses trabalhos 2 obras em parceria com o aluno, amigo e excelente profissional Willian Moreira da Costa; 2 com o estimado colega e amigo Prof. Jéferson Luiz Ferrari; além de 2 produções individuais. São marcas de um percurso construído em diálogo, cooperação e propósito.

A aposentadoria que se aproxima não se apresenta, para mim, como um ponto final, mas como uma pausa que reorganiza o tempo e renova os sentidos. Pretendo seguir como Professor Colaborador e aprofundar minha dedicação à escrita: hoje, não apenas um *hobby*, mas um modo de permanecer presente, contribuindo com a formação acadêmica, com o PPGA e com os leitores, em especial os produtores rurais.

Guardo, com especial apreço, uma lembrança de meu orientador de mestrado, Jim Griffith. Ao cumprimentá-lo pelo lançamento de seu primeiro livro, ouvi dele, com sua habitual simplicidade: “Você já lançou dezenas de bons livros, enriquecendo nossas referências e fortalecendo a área ambiental no Brasil e no mundo.” Recebi essas palavras com emoção silenciosa: como quem reconhece, no gesto do outro, a generosidade de um legado compartilhado.

A todos que fizeram e fazem parte dessa história, minha gratidão.

Professor Maurício Novaes

Guarapari, maio de 2026.

Prefácio

Ao iniciar a leitura de *Tópicos em Gestão Ambiental Vol. V*, o leitor é convidado a refletir sobre algo que ultrapassa o campo acadêmico e técnico: a própria possibilidade de continuidade da vida humana diante das pressões crescentes sobre os recursos naturais. Mais do que apresentar conceitos, a obra se coloca como um olhar atento e crítico sobre a realidade, evidenciando a urgência de ações concretas.

O modelo de desenvolvimento que sustenta a sociedade contemporânea, marcado pela busca constante por crescimento econômico e pelo consumo intensivo, tem desconsiderado os limites do crescimento que poderiam ser suportados pela natureza. Hoje, já não se trata de cenários futuros ou hipóteses distantes: as mudanças climáticas, a perda da biodiversidade e a escassez de recursos fazem parte do nosso cotidiano e revelam um sistema em desequilíbrio. Diante disso, torna-se inevitável repensar caminhos, rever práticas e reconstruir, de forma mais responsável, a relação entre sociedade e meio ambiente.

Nesse contexto, emerge um conceito central: a Gestão do Não-Retorno, tão evidenciada pelo cientista Carlos Nobre. Trata-se da necessidade de agir antes que sistemas naturais e sociais ultrapassem limites críticos irreversíveis, os chamados pontos de não retorno. A ciência tem demonstrado que esses limiares não são abstrações: são riscos reais, interconectados e potencialmente desencadeadores de mudanças abruptas e em cascata no sistema Terra.

A gestão ambiental, portanto, deixa de ser apenas um campo técnico voltado à mitigação de impactos e passa a assumir um papel estratégico: o de gerir riscos existenciais. Planejar, hoje, significa lidar com incertezas profundas, com fenômenos não lineares e com a urgência de fortalecer a resiliência socioecológica.

Este livro nasce dessa compreensão. Reúne reflexões, pesquisas e experiências que apontam caminhos possíveis: articulando ciência, educação, agroecologia, inovação e compromisso social. Mais do que apresentar respostas prontas, propõe novas formas de pensar e agir diante de um cenário que exige transformação.

Diante disso, torna-se evidente que o maior desafio contemporâneo não é apenas avançar no conhecimento, mas garantir as condições para que ele continue existindo. Como alertou o físico David Gross, o futuro da humanidade não está assegurado: depende das escolhas que fazemos agora. Em um mundo marcado por riscos crescentes, inclusive geopolíticos e ambientais, a continuidade da civilização deixa de ser uma certeza e passa a ser uma construção coletiva e urgente.

No contexto atual, marcado por crises climáticas, desigualdades estruturais e urgência por soluções sustentáveis, o livro de Schettino, *Educação e Gestão Ambiental: caminho da sustentabilidade no cotidiano da universidade* contribui significativamente para compreender como o modelo de desenvolvimento vigente tem falhado em integrar dimensões educacionais, sociais e ecológicas. Sua análise instiga a repensar a forma como o ser humano interage com o planeta, sugerindo caminhos para uma sociedade mais justa, resiliente e ambientalmente responsável.

A resenha que será apresentada a seguir, elaborada pela aluna Silvia Aline Bérghamo Xavier durante a disciplina de Agroecologia no Mestrado em Agroecologia do PPGA do Ifes Campus de Alegre, em 2024, oferece uma leitura crítica e reflexiva sobre as temáticas apresentadas por Luiz Fernando Schettino, articulando ciência, história, ética e sustentabilidade. Segue a resenha da Silvia, com pequenas adaptações:

Título do livro: *Educação e Gestão Ambiental: caminho da sustentabilidade no cotidiano da universidade*.

Autor: Luiz Fernando Schettino é mestre e doutor em Ciência Florestal, com especializações em Gestão Estratégica do Conhecimento e Inovação, bem como em Direito Processual Civil, Penal e do Trabalho. É licenciado em Letras (Português e Inglês), bacharel em Direito e professor titular da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Tese central do livro: consiste na análise da percepção da comunidade acadêmica acerca da sustentabilidade no Campus de Goiabeiras da UFES.

Questionamentos norteadores: os questionamentos norteadores da obra concentram-se no papel da educação ambiental no contexto universitário: como essa temática tem sido abordada? Os estudantes compreendem o conceito de sustentabilidade? A universidade tem efetivamente expandido suas práticas para além do espaço acadêmico, alcançando a comunidade? Nesse sentido, o objetivo do autor é promover o desenvolvimento e a ampliação de práticas de educação ambiental, sustentabilidade e inovação, tanto no âmbito da UFES quanto nas comunidades com as quais a instituição mantém relações.

A obra aborda o tema de forma clara, com linguagem acessível e didática, apresentando as legislações pertinentes e resgatando os marcos históricos que fundamentam a educação ambiental e o conceito de sustentabilidade. Além disso, discute os desafios enfrentados pela UFES na construção de uma compreensão mais ampla sobre sustentabilidade, evidenciando como a educação ambiental no meio acadêmico influencia a articulação entre ensino, pesquisa e extensão.

O livro: a pesquisa apresentada analisa a percepção da comunidade acadêmica, composta por alunos, professores e servidores, acerca da sustentabilidade. Busca compreender o papel da educação ambiental no contexto universitário, propondo a ampliação de atividades voltadas à sustentabilidade e à inovação, tanto no ambiente acadêmico quanto nas comunidades vinculadas à universidade. Parte-se do pressuposto de que práticas sustentáveis no cotidiano universitário tendem a ser incorporadas à vida profissional e pessoal dos indivíduos, fortalecendo a relação entre sociedade e sustentabilidade. A obra investiga, portanto, como a comunidade acadêmica percebe a sustentabilidade e a educação ambiental no Campus de Goiabeiras da UFES.

No âmbito da educação e da gestão ambiental, destaca-se a necessidade de equilíbrio entre ser humano e natureza, o que exige ações concretas, visto

que os impactos das atividades humanas incidem diretamente sobre o meio ambiente. A melhoria da qualidade ambiental está associada à harmonia com a natureza, sendo a educação e o conhecimento instrumentos fundamentais para a construção de uma sociedade mais sustentável.

Nesse contexto, são apresentadas práticas cotidianas relevantes, como a coleta seletiva, a redução do consumo de energia, construções sustentáveis e o uso de fontes renováveis. Ambientes educacionais sustentáveis tendem a estimular maior engajamento, promovendo a formação de cidadãos mais conscientes. A pesquisa também evidencia o papel dos gestores institucionais na promoção de práticas sustentáveis, reforçando a necessidade de intensificar ações de educação e gestão ambiental nas universidades.

A Constituição Federal de 1988, em seu artigo 225, inciso VI, estabelece a responsabilidade de promover a educação ambiental em todos os níveis de ensino. Assim, tanto o poder público quanto a sociedade têm o dever de proteger o meio ambiente. Dessa forma, torna-se imprescindível a adoção de medidas no ambiente acadêmico que ampliem a disseminação do conhecimento. A promoção da educação e da gestão ambiental é essencial diante do atual cenário de degradação, exigindo a construção de novos hábitos e valores sociais.

Embora existam múltiplos objetivos, destaca-se o papel da educação ambiental como instrumento de transformação institucional e social, promovendo práticas mais sustentáveis e impactando positivamente a sociedade. A educação ambiental consolidou-se a partir da segunda metade do século XX, com destaque para a Conferência de Estocolmo (1972), que contribuiu para a difusão do conceito de sustentabilidade em nível global.

Ainda há desafios para sua efetiva implantação, sendo a educação o principal meio de sensibilizar os indivíduos quanto ao seu papel na preservação ambiental. O crescimento econômico e tecnológico deve ocorrer em equilíbrio com o meio ambiente e os interesses sociais, promovendo melhor gestão dos recursos naturais e melhores condições de vida.

O desenvolvimento sustentável deve ser fortalecido por meio da integração entre ensino, pesquisa e extensão, contribuindo para a formação de cidadãos conscientes e capazes de atuar na promoção de práticas sustentáveis. O

conceito de meio ambiente deve ser compreendido em sentido amplo, conforme a Constituição de 1988. Embora as leis sejam fundamentais, sua eficácia depende das ações individuais e coletivas. Nesse sentido, o modelo econômico vigente precisa incorporar princípios de sustentabilidade, sendo a educação ambiental essencial nesse processo.

Refletir sobre o meio ambiente implica reconhecer sua complexidade e a necessidade de mudanças estruturais. As universidades devem incorporar práticas sustentáveis, promovendo experiências que fortaleçam essa formação. As instituições de ensino superior (IES) têm papel central na promoção da consciência ambiental, contribuindo para a preservação da biodiversidade e para o uso responsável dos recursos naturais. Devem, assim, consolidar-se como referências em responsabilidade socioambiental, orientando a construção de um futuro mais sustentável.

Conclusões: a educação e a gestão ambiental constituem caminhos essenciais para a promoção da sustentabilidade. É fundamental que a sociedade compreenda os conceitos básicos relacionados à temática ambiental, bem como as legislações pertinentes, de modo a promover atitudes pautadas na ética, no respeito e na transparência.

Os resultados da pesquisa indicam que a comunidade acadêmica apresenta familiaridade com os conceitos relacionados ao meio ambiente. No entanto, observa-se desconhecimento acerca das práticas ambientais desenvolvidas pela instituição. Tal constatação evidencia a necessidade de aprimorar a comunicação institucional, bem como de ampliar o acesso a recursos e parcerias com os setores público e privado, visando fortalecer a gestão ambiental.

Reitera-se a importância de integrar ações educativas ao processo de ensino, uma vez que a educação ambiental é fundamental para a construção da sustentabilidade. As instituições de ensino superior devem assumir papel protagonista na promoção de práticas ambientais, tanto no âmbito acadêmico quanto na comunidade, fortalecendo a tríade ensino, pesquisa e extensão.

Dessa forma, espera-se que os estudantes se tornem multiplicadores da consciência ambiental, contribuindo para o uso responsável dos recursos naturais. A transição para um modelo sustentável e socialmente justo é urgente e deve ser iniciada de forma imediata.

“Cuidar do meio ambiente deve ser prioridade, pois é cuidar da vida e da qualidade de vida” (Schettino, 2019).

Referência: SCHETTINO, L. F. **Educação e gestão ambiental:** caminho da sustentabilidade no cotidiano da universidade. 1. ed. Vitória, Espírito Santo: Edição do autor, 2019. 292 p.

As análises aqui apresentadas destacam questões fundamentais sobre a intersecção entre desigualdade social, pobreza, degradação ambiental e a necessidade de uma gestão responsável dos recursos naturais. O reconhecimento de que ainda existem indivíduos, grupos e instituições que negam ou minimizam a gravidade dessas relações constitui um dos principais desafios para a consolidação de políticas públicas e práticas efetivamente sustentáveis. Tal postura, frequentemente associada a interesses econômicos, visões reducionistas ou à desinformação, reforça a urgência de fortalecer a educação ambiental, o diálogo interdisciplinar e a ação coletiva como instrumentos essenciais para aproximar conhecimento científico, ética e prática social.

Nesse contexto, a obra *Educação e Gestão Ambiental: caminho da sustentabilidade no cotidiano da universidade*, de Luiz Fernando Schettino, adquire relevância analítica e aplicada. O livro evidencia que os desafios socioambientais contemporâneos não podem ser compreendidos de forma fragmentada, mas devem ser analisados a partir de uma perspectiva sistêmica, na qual as dimensões sociais, econômicas e ambientais se encontram profundamente interligadas. Ao abordar a realidade da comunidade acadêmica, o autor demonstra que a construção da sustentabilidade passa, necessariamente, pelo fortalecimento da educação ambiental como prática formativa e transformadora.

A obra de Schettino revela que a universidade ocupa um papel estratégico na promoção de novos paradigmas de desenvolvimento. Ao investigar a percepção de estudantes, professores e servidores, o autor evidencia lacunas importantes entre o conhecimento conceitual e a efetivação de práticas sustentáveis no cotidiano institucional. Esse distanciamento aponta para a necessidade de integrar, de maneira mais efetiva, as dimensões de ensino, pesquisa e extensão, promovendo uma formação que ultrapasse o plano teórico e se materialize em ações concretas.

A reflexão proposta pelo autor também evidencia um aspecto central da crise contemporânea: a dificuldade de transformar conhecimento em ação. Ainda que haja avanços na compreensão dos problemas ambientais, persistem desafios na incorporação de práticas sustentáveis nas rotinas institucionais e sociais. Nesse sentido, a educação ambiental assume um papel fundamental, não apenas como instrumento de conscientização, mas como base para a construção de valores, atitudes e comportamentos alinhados à sustentabilidade.

Diante desse cenário, torna-se evidente que a superação dos desafios socioambientais exige a revisão dos modelos de desenvolvimento vigentes. A promoção da sustentabilidade demanda políticas públicas integradas, práticas institucionais coerentes e o engajamento ativo da sociedade. Nesse processo, a universidade deve se consolidar como espaço de inovação, reflexão crítica e formação cidadã, contribuindo para a construção de uma sociedade mais justa, equilibrada e ambientalmente responsável.

Ao final do prefácio desta obra, cito a música “Xote Ecológico”. Encerrando esta reflexão, é inevitável recorrer à sensibilidade poética e filosófica de Luiz Gonzaga, que nos convida a meditar sobre a passagem do tempo e o poder transformador que ele exerce sobre a vida e sobre as civilizações.

Diante desse cenário, torna-se evidente que a superação dos desafios socioambientais exige a revisão dos modelos de desenvolvimento vigentes. A promoção da sustentabilidade demanda políticas públicas integradas, práticas institucionais coerentes e o engajamento ativo da sociedade. Nesse processo, a universidade deve se consolidar como espaço de inovação, reflexão crítica e formação cidadã, contribuindo para a construção de uma sociedade mais justa, equilibrada e ambientalmente responsável.

Nesse sentido, a dimensão cultural e simbólica também se revela fundamental para a compreensão da crise ambiental contemporânea. A canção Xote Ecológico sintetiza, de forma sensível e contundente, as contradições do modelo de desenvolvimento atual. Ao expressar, em linguagem simples e direta, a degradação dos recursos naturais, o esgotamento dos sistemas produtivos e a perda da qualidade de vida, seus versos traduzem aquilo que a ciência tem reiteradamente demonstrado: a insustentabilidade das práticas humanas diante dos limites ecológicos do planeta.

Ao denunciar a poluição, a escassez de recursos e a invisibilização progressiva da natureza: “cadê a flor?”, “cadê o verde?”; a música evidencia a perda da percepção ambiental, aspecto central discutido ao longo desta obra. Tal desconexão entre sociedade e natureza reforça a necessidade de ampliar e fortalecer a educação ambiental como instrumento de transformação social.

Além disso, ao mencionar a figura de Chico Mendes, a canção introduz a dimensão ética e política da questão ambiental, lembrando que a defesa do meio ambiente está intrinsecamente ligada à justiça social e aos direitos humanos. A gestão ambiental, portanto, não pode ser compreendida apenas como um campo técnico, mas como uma prática comprometida com a equidade, a cidadania e a sustentabilidade.

Dessa forma, a mensagem presente em “Xote Ecológico” não se limita a uma denúncia, mas se configura como um alerta urgente. Ela reafirma que o futuro depende das escolhas realizadas no presente e que a construção de uma sociedade sustentável exige consciência, responsabilidade e ação coletiva. Assim, a educação e a gestão ambiental se consolidam como caminhos indispensáveis para a promoção de uma nova racionalidade, capaz de harmonizar desenvolvimento, justiça social e equilíbrio ecológico.

É nesse espírito que se insere o livro *Tópicos em Gestão Ambiental Volume V*, que reúne reflexões, pesquisas e experiências voltadas à agroecologia, à agricultura familiar e à sustentabilidade. A obra busca ampliar o olhar dos leitores para além das fronteiras disciplinares, oferecendo instrumentos teóricos e práticos para decisões fundamentadas e conscientes. Em tempos de crise climática e incertezas globais, uma sociedade bem informada e ambientalmente educada constitui condição mínima para qualquer transformação duradoura.

Realidades contemporâneas demonstram que a superação das desigualdades depende da construção de instituições inclusivas, capazes de distribuir oportunidades e fortalecer a cidadania. Nesse contexto, a gestão ambiental deve ser compreendida como um instrumento de justiça social, uma estratégia que visa proteger os ecossistemas e, simultaneamente, garantir dignidade e equidade às populações que deles dependem.

O momento histórico que vivemos é, ao mesmo tempo, um alerta e uma oportunidade. O alerta se manifesta nos limites críticos do planeta, evidenciados por eventos extremos como secas, enchentes, ondas de calor e perda acelerada da biodiversidade. A oportunidade, por sua vez, reside na capacidade humana de aprender com o passado e de reconstruir o futuro a partir de novos paradigmas, fundamentados no conhecimento científico, na agroecologia, na cooperação e na solidariedade.

Assim, este livro configura-se também como um chamado à ação: um convite à reflexão crítica e à responsabilidade coletiva. A integração entre ciência, ética e sensibilidade humana apresenta-se como caminho para transformar a constatação da crise em estratégias de resiliência e o risco de colapso em possibilidade de reconstrução.

Nesse sentido, a gestão ambiental assume um novo significado: não apenas evitar colapsos, mas construir, de forma deliberada, um caminho de não retorno para a sustentabilidade, a regeneração e a justiça socioambiental.

Que esta obra inspire uma nova forma de pensar e agir, pautada pela resiliência, pela equidade e pela recuperação dos ecossistemas. Que contribua para transformar a crise em consciência, a consciência em ação e a ação em um futuro que não apenas sobreviva, mas prospere em um planeta ambientalmente equilibrado.

Este livro é, portanto, um convite: à reflexão, à responsabilidade e, sobretudo, à ação.

Professor Maurício Novaes Souza

Guarapari, maio de 2026.

EPÍGRAFE

“Xote Ecológico”

Luiz Gonzaga

Não posso respirar, não posso mais nadar
A terra está morrendo, não dá mais pra plantar
E se plantar não nasce, se nascer não dá
Até pinga da boa é difícil de encontrar

Não posso respirar, não posso mais nadar
A terra está morrendo, não dá mais pra plantar
E se plantar não nasce, se nascer não dá
Até pinga da boa é difícil de encontrar

Cadê a flor que estava aqui?
Poluição comeu
E o peixe que é do mar?
Poluição comeu
E o verde onde é que está?
Poluição comeu
Nem o Chico Mendes sobreviveu!

Apresentação

Ao longo da história recente, testemunhamos o avanço de uma crise que já não respeita fronteiras geográficas, científicas ou políticas: a crise climática e ambiental que tensiona os próprios fundamentos do modelo de desenvolvimento vigente. Em 2023, a superfície de água no Brasil atingiu o menor índice desde 1985, cobrindo apenas 18,3 milhões de hectares, cerca de 2% do território nacional, conforme o MapBiomas Água. A redução, embora numericamente discreta, revela um processo contínuo de degradação, agravado pelas mudanças climáticas e pela ação humana. Mais grave ainda é o declínio dos corpos hídricos naturais, que perderam 30,8% de sua extensão em menos de quatro décadas: um esvaziamento silencioso, porém profundamente eloquente.

Na Bacia do Rio São Francisco, onde fiz minha tese de doutoramento, esse processo assume contornos dramáticos: a vazão anual no centro-norte caiu mais de 60% nas últimas três décadas, segundo o LAPIS/UFAL. As chamadas secas-relâmpago, intensificadas pelo aumento das temperaturas e pela irregularidade das chuvas, somam-se ao desmatamento e ao uso intensivo do solo, alterando o ciclo hidrológico e comprometendo a capacidade de regeneração dos sistemas naturais. O que se observa não é apenas escassez, é a erosão de uma lógica ecológica que sustentou, por séculos, a vida em equilíbrio.

Esses dados não são apenas indicadores, são sinais. Sinais de que atravessamos o limiar de uma nova era: a dos limites críticos. Uma era em que o tempo deixa de ser apenas cronológico e passa a ser também ecológico; em que o futuro já não é promessa, mas incerteza condicionada às escolhas do presente. Nesse cenário, a gestão ambiental precisa ser ressignificada: não mais como prática periférica, mas como uma verdadeira Gestão do Não-Retorno, aquela que reconhece a urgência, antecipa rupturas e constrói caminhos de resiliência antes que os sistemas colapsem.

É nesse horizonte que se insere o livro *Tópicos em Gestão Ambiental Volume V*. Mais do que uma coletânea de estudos, a obra constitui um espaço de convergência entre ciência, experiência e compromisso ético. Seus capítulos não apenas descrevem problemas: oferecem leituras, caminhos e possibilidades. Ao articular agroecologia, recuperação de ecossistemas, gestão

participativa e inovação, o livro convida o leitor a ultrapassar a fragmentação do conhecimento e a compreender a complexidade das relações entre sociedade e natureza.

Minha trajetória na Gestão Ambiental encontra, nesta obra, mais um capítulo de uma construção coletiva que se desdobra em diferentes séries: *Tópicos em Cafeicultura*, *Tópicos em Agroecologia*, *Tópicos em Recuperação de Áreas Degradadas* e *Tópicos em Gestão Ambiental*. Essas publicações não são apenas registros acadêmicos: são expressões de uma rede viva de colaboração entre alunos, colegas, pesquisadores e produtores, que compartilham o compromisso de fazer do conhecimento uma ferramenta de transformação. No âmbito do PPGA do Ifes campus de Alegre, essa caminhada tem fortalecido pontes entre a universidade e a sociedade, entre a teoria e a prática, entre o saber e o fazer.

Projetos de recuperação ambiental, sistemas agroflorestais e iniciativas de gestão integrada revelam que ainda há caminhos possíveis: desde que sejamos capazes de aprender com a natureza, e não apenas explorá-la. A recuperação de matas ciliares, a proteção dos recursos hídricos e o cuidado com os solos não são apenas ações técnicas: são gestos civilizatórios, escolhas que definem o tipo de futuro que desejamos construir.

Nesse ponto, a canção Xote Ecológico ressoa como um eco sensível dessa realidade. Em sua simplicidade poética, ela denuncia a ausência da água, do verde, da vida, e transforma essa ausência em consciência. Não se trata apenas de uma crítica, mas de um espelho: nele, vemos refletida a consequência de nossas escolhas e, ao mesmo tempo, a urgência de transformá-las. A canção nos lembra de que a degradação não é abstrata: ela tem som, tem imagem, tem ausência.

Este prefácio, portanto, não pretende apenas apresentar uma obra. Pretende convocar. Convocar à reflexão, mas também ao compromisso; à consciência, mas, sobretudo à ação: já não basta compreender a crise, é preciso atravessá-la com responsabilidade. Já não basta reconhecer os limites, é preciso reinventar as possibilidades dentro deles.

Se há um tempo que nos interpela, é o presente. Um tempo em que cada decisão carrega o peso do irreversível e, ao mesmo tempo, a potência da reconstrução. Que esta obra inspire não apenas novas ideias, mas novas atitudes. Que nos ajude a transformar o alerta em aprendizado, o conhecimento em prática e a urgência em movimento. Que, ao final, possamos não apenas evitar o colapso, mas construir, com coragem, lucidez e esperança, um caminho de não retorno para a vida.

O **Volume I de Tópicos em Gestão Ambiental** ressalta a importância do planejamento sustentável e das práticas agroecológicas na recuperação de áreas degradadas. Ao integrar produção e equilíbrio ecológico, promove a biodiversidade e a redução de impactos ambientais. Essa abordagem oferece base para ações de longo prazo, reforçando a necessidade de soluções sustentáveis diante dos desafios atuais. É composto por dez (10) capítulos:

Capítulo I: “Degradação ambiental pelo fator antrópico e formas de mitigação: uma breve análise da agropecuária e seus impactos no meio ambiente”

Capítulo II: “Agricultura convencional, tradicional e agroecológica: gestão ambiental e as mudanças nos modelos de produção”

Capítulo III: “Agroecologia e sua importância no contexto da sustentabilidade”

Capítulo IV: “Aspectos fundamentais da transição agroecológica”

Capítulo V: “Limites do crescimento e gestão dos recursos naturais”

Capítulo VI: “Procedimentos e ferramentas de suporte à sustentabilidade agropecuária”

Capítulo VII: “Levantamento e planejamento conservacionista no sítio Cachoeira Alegre”

Capítulo VIII: “Sistemas agroflorestais como estratégia mitigadora: benefícios na atenuação do estresse térmico em bovinos”

Capítulo IX: “Incêndios nas Unidades de Conservação estaduais do Espírito Santo: formas de prevenção e combate”

Capítulo X: “Assistência técnica e extensão rural: relevância no processo do desenvolvimento rural capixaba”

O Volume I dos “Tópicos em Gestão Ambiental” está disponível em:

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

O **Volume II de Tópicos em Gestão Ambiental** destacou a integração da gestão ambiental nas atividades empresariais e na recuperação de áreas degradadas como estratégia de prevenção. Apresentou soluções como sistemas de gestão, compostagem, uso de óleos essenciais, saneamento e o programa Reflorestar, além do uso de geotecnologias, SAFs e do fortalecimento do cooperativismo, promovendo sustentabilidade e resiliência socioambiental. Para tratar desses temas, o livro é composto pelos seguintes dez (10) capítulos:

Capítulo I: “Sistemas de administração da produção e tecnologias apropriadas: agroecologia e sustentabilidade socioambiental”

Capítulo II: “Impactos e externalidades ambientais negativos das atividades agropecuárias”

Capítulo III: “Práticas Agroecológicas: contribuição ao saneamento ambiental e à recuperação de áreas degradadas”

Capítulo IV: “Agricultura familiar e agroecologia: recuperação de áreas degradadas e sustentabilidade”

Capítulo V: “Avaliação das contribuições do programa REFLORESTAR em propriedades rurais localizadas no município de Muniz Freire/ES

Capítulo VI: “Aspectos geográficos do município de Presidente Kennedy-ES e sua relação com o desenvolvimento sustentável”

Capítulo VII: “Contribuições da cultura da banana em Sistemas Agroflorestais no Espírito Santo”

Capítulo VIII: “Atuação de óleos essenciais no controle biológico da requeima (*Phytophthora infestans*) no cultivo de batata”

Capítulo IX: “Compostagem: processo de transformação de recursos endógenos em fertilizantes”

Capítulo X: “Cooperativismo e associativismo: importância para a sustentabilidade da agricultura familiar”.

O Volume II dos “Tópicos em Gestão Ambiental” está disponível em:

<https://www.meridapublishers.com/tga2/>

O **Volume III de Tópicos em Gestão Ambiental** reforça a integração da gestão ambiental nas atividades empresariais, com foco na prevenção e na recuperação de áreas degradadas. Diante dos desafios atuais, destaca soluções sustentáveis, como sistemas de gestão modernos e o uso de tecnologias para

reduzir impactos ambientais. Para tratar desses temas, o livro é composto pelos seguintes dez (10) capítulos:

Capítulo I: “Diferenças entre agroecologia, agricultura orgânica e transição agroecológica”

Capítulo II: “Floresta Nacional de Pacotuba: histórico de criação, biodiversidade e atividades de uso público”

Capítulo III: “Floresta Nacional de Pacotuba: promoção da conservação por intermédio de ações de manejo”

Capítulo IV: “Horta pedagógica como estratégia de educação ambiental”

Capítulo V: “Educação ambiental como ferramenta de ensino da agroecologia e sustentabilidade”

Capítulo VI: “Uso de óleos essenciais e extrato de abacate no controle de ácaros-rajados em morangueiro”

Capítulo VII: “Abelhas nativas sem ferrão: biologia, importância econômica, meliponicultura e função ecológica na recuperação de ambientes”

Capítulo VIII: “A importância da mandioca para a agricultura familiar e dos saberes dos “Povos Indígenas” no reconhecimento de tecnologia ancestral no seu manejo”

Capítulo IX: “Manejo reprodutivo de bovinos leiteiros visando um sistema sustentável”

Capítulo X: “Pedagogias e gestão da sustentabilidade nas abordagens ensino-aprendizagem”.

O Volume III dos “Tópicos em Gestão Ambiental” está disponível em:

<https://www.meridapublishers.com/tga3/>

O **Volume IV de Tópicos em Gestão Ambiental** reúne reflexões sobre agroecologia, agricultura familiar e sustentabilidade, ampliando o olhar interdisciplinar diante da crise climática. A obra entende a gestão ambiental como instrumento de proteção ecológica e de justiça social, ao valorizar dignidade e equidade. Propõe a integração entre ciência, ética e sensibilidade, estimulando a construção de uma nova racionalidade ambiental voltada à ação e à sustentabilidade. Para tratar desses temas, o livro é composto pelos seguintes dez (10) capítulos:

Capítulo I: “Agricultura sintrópica como estratégia de conservação ambiental e produtividade sustentável”

Capítulo II: “A multifuncionalidade dos quintais agroecológicos: perspectivas para educação ambiental e paisagismo sustentável”

Capítulo III: “Influência do Jacarandá-da-Bahia (*Dalbergia nigra*) sobre o desempenho de Sistemas Silvistoris”

Capítulo IV: “Análise da viabilidade econômica de sistemas agroflorestais em áreas do Programa Reflorestar no Espírito Santo”

Capítulo V: “Análise integrada das práticas de manejo, cultivares e sistemas agroflorestais na Fazenda Experimental de Bananal do Norte (FEBN), Cachoeiro de Itapemirim, ES”

Capítulo VI: “Bioindicação da qualidade do solo: papel ecológico e funcional da macrofauna edáfica”

Capítulo VII: “Barraginhas e cochinchos em curva de nível: estratégias de conservação do solo e da água em Atílio Vivácqua-ES”

Capítulo VIII: “Bacia hidrográfica do rio Castelo, ES: integração entre conhecimento científico e educação para a sustentabilidade”

Capítulo IX: “Diversificação agrícola e comercialização de produtos vegetais em assentamentos e comunidades rurais do Sul do Espírito Santo”

Capítulo X: “Agroecologia e protagonismo feminino no cultivo de cafés especiais em Vila Pontões, Afonso Cláudio, ES”

O Volume IV dos “Tópicos em Gestão Ambiental” está disponível em:

<https://www.meridapublishers.com/tga3-2/>

O **Volume V de Tópicos em Gestão Ambiental** reúne estudos e experiências sobre agroecologia, agricultura familiar e sustentabilidade, articulando teoria e prática para apoiar decisões diante da crise climática. A obra trata a gestão ambiental como instrumento de conservação e justiça social, ao defender dignidade e equidade para as comunidades. Ao integrar ciência, ética e sensibilidade, propõe transformar desafios em resiliência e estimular ações concretas em favor de um futuro sustentável. Para tratar desses temas, o livro é composto pelos seguintes dez (10) capítulos:

O **Capítulo I, “Gestão ambiental e as dimensões da sustentabilidade agroecológica”**, apresenta a agroecologia como uma abordagem integrada que promove benefícios ambientais, sociais e econômicos. Destaca o papel da matéria orgânica na fertilidade do solo, na retenção de água e na atividade microbiana, associada a práticas como diversificação de culturas, adubação

verde e cobertura do solo. No âmbito social, valoriza o conhecimento tradicional, fortalece comunidades e contribui para a segurança alimentar. Economicamente, reduz custos e a dependência de insumos externos, além de ampliar oportunidades de mercado. Também contribui para a mitigação das mudanças climáticas, consolidando-se como uma estratégia viável de desenvolvimento sustentável.

O **Capítulo II, “Defesa vegetal em sistemas agroecológicos: fundamentos fisiológicos, microbiológicos e interações ecológicas”** aborda os mecanismos fisiológicos, bioquímicos e ecológicos que permitem às plantas se protegerem de pragas e doenças. Destaca estratégias naturais como barreiras físicas, compostos químicos e respostas induzidas. No enfoque agroecológico, práticas como adubação orgânica, cobertura do solo, adubação verde e consórcios fortalecem essas defesas, estimulam a microbiota e promovem equilíbrio ecológico. A teoria da trofobiose reforça que o equilíbrio nutricional é essencial para a saúde das plantas e a resiliência dos sistemas produtivos.

O **Capítulo III “Sistemas de produção integrados como estratégia para o conforto térmico e a sustentabilidade na bovinocultura leiteira”** aborda os desafios da bovinocultura leiteira, como o estresse térmico e a degradação das pastagens, destacando sistemas integrados, como ILPF, SAFs e sistemas silvipastoris, como alternativas sustentáveis. Ao integrar árvores, forrageiras e animais, esses sistemas promovem sombreamento, melhoram o conforto térmico, favorecem o bem-estar animal e contribuem para a recuperação ambiental e a resiliência produtiva.

O **Capítulo IV “Integração de estratégias sustentáveis: Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e Sistemas Agroflorestais (SAFs) como alternativas ao enfrentamento da degradação ambiental”** discute a degradação ambiental e seus impactos, ressaltando a agroecologia como caminho sustentável. Destaca o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), especialmente no Espírito Santo, como incentivo à adoção de práticas como os Sistemas Agroflorestais, promovendo conservação dos recursos naturais, mitigação climática e geração de renda para agricultores familiares.

O **Capítulo V, “Uso de resíduos orgânicos na formulação de substratos para a produção de mudas de espécies florestais nativas da Mata Atlântica”**, destaca a produção de mudas como etapa essencial para a restauração ecológica. Enfatiza o uso de resíduos orgânicos, como casca de café, fibra de coco, casca de arroz carbonizada e bagaço de cana, na formulação de substratos, melhorando suas propriedades e favorecendo o desenvolvimento das mudas, especialmente em proporções de 30% a 40%. Além dos ganhos técnicos, a prática reduz custos e fortalece viveiros comunitários, contribuindo para a restauração ambiental sustentável.

O **Capítulo VI, “Potencial de óleos essenciais no controle de *Colletotrichum* em pós-colheita”** destaca a antracnose como importante doença em culturas tropicais, responsável por perdas significativas. Diante das limitações dos fungicidas sintéticos, apresenta os óleos essenciais e extratos vegetais como alternativas sustentáveis, com ação fungitóxica. Óleos como o de capim-santo, alecrim-pimenta e alfavaca-cravo demonstram bons resultados, assim como

extratos cítricos e óleo de alho. Apesar do potencial, a eficácia depende da dose, do hospedeiro e das condições de uso, podendo haver limitações como fitotoxicidade. Ainda assim, essas alternativas se mostram promissoras quando integradas a práticas sustentáveis de manejo.

O **Capítulo VII, “Incidência de *Streptococcus agalactiae* e estratégias de controle sanitário na tilapicultura: diagnósticos e perspectivas para o sul do Espírito Santo”** analisa os desafios sanitários da tilapicultura na região, destacando a infecção por *Streptococcus agalactiae* como problema relevante. Aponta que a intensificação dos cultivos favorece a ocorrência de doenças, especialmente pelo estresse e variações na qualidade da água. O sorotipo III é identificado como mais virulento. Como alternativa, destaca o sistema de Bioflocos (BFT), que melhora a qualidade da água e contribui para o controle sanitário. As estratégias priorizam biossegurança e vacinação, reduzindo o uso de antimicrobianos, e incluem um *checklist* prático para aplicação no campo, fortalecendo a integração entre pesquisa e extensão.

O **Capítulo VIII, “Qualidade físico-química e microbiológica da água em bebedouro e poço artesiano em Alegre–ES: uma análise comparativa”** avalia a qualidade da água com base em parâmetros físicos, químicos e microbiológicos. Embora pH, turbidez e dureza estejam adequados, foram identificados indícios de alteração, como alta condutividade no poço e presença de amônia, sugerindo possível contaminação. Mesmo sem detecção de coliformes no momento, o histórico reforça a necessidade de monitoramento contínuo e gestão adequada dos recursos hídricos.

O **Capítulo IX, “Levantamento de indicadores econômicos e de contratos municipais de serviços de limpeza urbana do estado do Espírito Santo”** analisa os custos da limpeza urbana e aponta seu alto impacto financeiro aliado à baixa arrecadação tarifária. Destaca que práticas como coleta seletiva, compostagem e reaproveitamento de resíduos, alinhadas à agroecologia, reduzem custos e volumes destinados à disposição final. Evidencia também a falta de padronização contratual, indicando a necessidade de maior organização para eficiência e sustentabilidade na gestão pública.

O **Capítulo X, “Educação inclusiva e agroecologia: construindo caminhos de acessibilidade metodológica no ensino de ciências da natureza”**, discute a integração entre inclusão e agroecologia no ensino, propondo abordagens que valorizem a acessibilidade metodológica e o aprendizado significativo. Ao articular educação ambiental, reaproveitamento de recursos e valorização dos ciclos naturais, contribui para formar sujeitos críticos e conscientes, além de fortalecer práticas sustentáveis no contexto educacional.

Nas **Considerações Finais**, evidencia-se a urgência de transformar os conceitos discutidos ao longo deste trabalho em ações concretas e eficazes, articulando-os com os diferentes eixos temáticos abordados. A reflexão sobre a gestão ambiental e as dimensões da sustentabilidade agroecológica reforça a

necessidade de superação do modelo produtivo convencional, historicamente marcado pela degradação ambiental, exploração intensiva dos recursos naturais e aprofundamento das desigualdades sociais.

Nesse contexto, os fundamentos da defesa vegetal em sistemas agroecológicos, baseados em processos fisiológicos, microbiológicos e nas interações ecológicas, demonstram que é possível reduzir a dependência de insumos químicos por meio do fortalecimento dos mecanismos naturais de resistência das plantas. De forma complementar, o uso do potencial de óleos essenciais no controle de patógenos, como *Colletotrichum* em pós-colheita, evidencia alternativas viáveis e sustentáveis no manejo fitossanitário.

A adoção de sistemas de produção integrados, como os Sistemas Agroflorestais (SAFs), Sistemas Silvopastoris (SSPs) e a agricultura sintrópica, mostra-se estratégica não apenas para a regeneração ambiental, mas também para a promoção do conforto térmico na bovinocultura leiteira, contribuindo para o bem-estar animal e o aumento da produtividade. Esses sistemas, aliados à integração de estratégias como o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), configuram importantes mecanismos de incentivo à conservação e recuperação de ecossistemas degradados.

A valorização do reaproveitamento de recursos também se destaca, como no uso de resíduos orgânicos na formulação de substratos para produção de mudas florestais nativas da Mata Atlântica, promovendo economia circular, redução de impactos ambientais e fortalecimento de iniciativas de restauração ecológica.

No campo da sanidade aquícola e da qualidade ambiental, estudos sobre a incidência de *Streptococcus agalactiae* na tilapicultura, bem como a análise da qualidade físico-química e microbiológica da água, evidenciam a importância do monitoramento e da adoção de práticas sanitárias adequadas para garantir a sustentabilidade produtiva e a segurança alimentar.

Paralelamente, a avaliação de indicadores econômicos e contratos de serviços de limpeza urbana no Espírito Santo reforça a necessidade de uma gestão pública eficiente e alinhada aos princípios da sustentabilidade, sobretudo diante dos desafios relacionados ao saneamento e à gestão de resíduos sólidos.

A crise hídrica recente, observada em importantes bacias hidrográficas brasileiras e também em contextos locais, evidencia a urgência de práticas integradas de conservação da água e do solo, como recuperação de matas ciliares, diversificação produtiva e adoção de tecnologias sociais. Tais ações, quando articuladas com políticas públicas e instrumentos econômicos, ampliam a resiliência dos sistemas socioecológicos.

Destaca-se ainda o papel central da educação inclusiva e da agroecologia na construção de caminhos que promovam acessibilidade metodológica e formação crítica, ampliando o alcance das práticas sustentáveis e fortalecendo a participação social. Experiências exitosas, como as de associações de mulheres rurais e iniciativas da agricultura familiar, demonstram que a sustentabilidade está intrinsecamente ligada à equidade, à valorização dos saberes locais e ao fortalecimento das redes comunitárias.

Por fim, a análise integrada dos temas evidencia que, embora existam tecnologias e práticas inovadoras disponíveis, persistem desafios relacionados à disseminação do conhecimento, à ampliação de investimentos e à consolidação de políticas públicas efetivas. A convergência entre agroecologia, sistemas integrados de produção, gestão ambiental, inclusão social e inovação tecnológica configura um caminho promissor para enfrentar a degradação ambiental, promover o desenvolvimento sustentável e garantir qualidade de vida para as gerações presentes e futuras.

Professor Maurício Novaes Souza

Guarapari, maio de 2025.

Autores

Ana Terra Bravim dos Santos

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

Aparecida de Fátima Madella de Oliveira

Professora 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: amadella@ifes.edu.br

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.

Bruna Chaves Amaral

Rua Doutor Wanderley, 302. Centro, Alegre, ES. E-mail: eng.brunachaves@gmail.com

Carla Sardinha de Oliveira

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

Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira

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

Clarissa Alves de Novaes

Professora do Instituto Federal Sudeste de Minas campus Muriaé. Av. Cel. Monteiro de Castro, 550 - Barra, Muriaé, MG, 36.884-036. E-mail: clarissa.novaes@ifsudestemg.edu.br

Dâmaris de Souza Guimarães

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

Daniela Fosse Valbao

Magistério pela Escola Estadual Aristeu Aguiar, Licenciada e Bacharela pelo Instituto Federal do Espírito Santo Campus Alegre, e aspirante ao Mestrado do Instituto Federal do Espírito Santo - IFES. Endereço: IFES Campus de Alegre - Distrito de Rive - Alegre, ES. E-mail: danielafossi1@gmail.com

Daniel Schwan Monteiro de Sousa

Graduando em Técnico em Agricultura em Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR) Polo Cachoeiro de Itapemirim, Rua Agripino Oliveira, 60 - Independência, Cachoeiro de Itapemirim - ES, 29.306-500. E-mail: ss.daniel096@gmail.com

Déborah Sampaio de Almeida

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

Erivelto Oliveira de Souza

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

Esteffany Pereira da Silva

Doutoranda pelo Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal do Espírito Santo campus de Alegre. Caixa Postal 16. CEP: 29.500-000, Alegre, ES. E-mail: esteffanypereira067@gmail.com

Fernanda Barcelos de Paula

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

Gabriela Alves de Novaes

Administradora de empresas pela UFV e Especialista em Gestão Estratégica de Pessoas pela Universidade Federal de São João del-Rei. Avenida Bias Fortes, 1122, Centro, Belo Horizonte - MG. CEP: 30.170-014. E-mail: gabianovaes@yahoo.com.br

Gabriel Souza Mendonça

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

Isabela Berbert da Guia

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

Jainny Juliany Mathias das Neves

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

Jodielli Santana de Andrade

UniSales - Centro Universitário Salesiano. E-mail: jodielli.25@gmail.com

Jozimara Teixeira de Souza

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

Kamilla Matos Boldrini

Licenciada pelo Instituto Federal do Espírito Santo Campus Alegre. Endereço: IFES Campus de Alegre, Distrito de Rive, Alegre, ES. E-mail: boldrinikamilla@gmail.com.

Krisley Camila Morais Lopes

Mestranda 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: morais.camila.lopes@gmail.com.

Laís Viana Bruneli

Técnica agrícola pelo Instituto Federal do Espírito Santo Campus Alegre, Engenheira agrônoma pela Universidade Federal do Espírito Santo Campus Alegre e Mestranda em Fitotecnia pela Universidade de São Paulo Campus Luiz de Queiroz - USP-Esalq. Endereço: Av. São João. Piracicaba, SP. E-mail: laisvbruneli@gmail.com.

Leonard Campos Avellar Machado

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

Lessa Braz Lopes

Licenciada e Bacharelada em Ciências Biológicas, Mestranda em Agroecologia pelo Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Ifes - Campus de Alegre, CEP: 29.520-000, Alegre, ES. E-mail: bio.lessalopes@gmail.com

Lucas de Brites Senra

Tecnólogo em Aquicultura Especialista em Educação Ambiental e Manejo de Recursos Naturais e Mestrando em Agroecologia pelo Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Ifes Campus Alegre, Caixa Postal 47, CEP: 29.500-000, Alegre, ES. E-mail: lucasbrites22@gmail.com.

Macllene Rodrigues Zeferino

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

Marcos Willians Campos de Almeida

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: marcoswillians1998@gmail.com

Maurício Novaes Souza

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: mauricios.novaes@ifes.edu.br

Naianni de Sillis Rezende

Licenciada em Ciências Biológicas, Graduanda em Bacharelado em Ciências Biológicas e Mestranda em Agroecologia pelo Programa e Pós-Graduação em Agroecologia do Ifes – Campus de Alegre, Caixa Postal 47, CEP: 29.500-000, Alegre, ES. E-mail: naianni.sr@gmail.com

Oseas de Almeida Lima

Doutorando pelo Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal do Espírito Santo campus de Alegre. Caixa Postal 16. CEP: 29.500-000, Alegre, ES. E-mail: 90oseas@gmail.com

Pedro Pierro Mendonça

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: ppierrom@gmail.com

Raquel Sueleni Cardoso Mariano

Licenciada em Ciências Biológicas e Mestranda em Agroecologia pelo Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Ifes - Campus de Alegre, Caixa Postal 47, CEP: 29.500-000, Alegre, ES. E-mail: raquelmariano465@gmail.com

Rony Mendes Rodrigues

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

Salomão Martins de Carvalho Júnior

Bacharel em engenharia de agrimensura, Licenciado em Matemática, especialista em ensino religioso, Mestre em engenharia civil e doutorando em Agroecologia pelo Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Ifes Campus de Alegre, Caixa Postal 47, CEP 29.500-000, Alegre, ES. E-mail: salomao.junior@ifes.edu.br

Sara de Oliveira Olimpio

Licenciada em Ciências Biológicas pelo Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Alegre, mestranda em agroecologia pelo Programa de Pós Graduação em Agroecologia do IFES- Campus Alegre, Caixa postal 47, CEP 29500-000, Alegre, ES. E-mail: saraolimpio72@gmail.com.

Silvia Aline Bérghamo Xavier

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

Tamiris da Silva Gumiere

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

Welington Moreira da Silva

Rua Joaquim Barbosa Mendes, 42, Bairro Ipê. E-mail: welington.moreira2014@hotmail.com

Willian Moreira da Costa

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

Índice

CAPÍTULO 1..... 36

Gestão ambiental e as dimensões da sustentabilidade agroecológica

Maurício Novaes Souza, Willian Moreira da Costa, Atanásio Alves do Amaral, Tamiris da Silva Gumiere, Leonard Campos Avellar Machado, Silvia Aline Bérghamo Xavier, Isabela Berbert da Guia, Ana Terra Bravim dos Santos, Déborah Sampaio de Almeida

CAPÍTULO 2..... 59

Defesa vegetal em sistemas agroecológicos: fundamentos fisiológicos, microbiológicos e interações ecológicas

Daniel Schwan Monteiro de Sousa, Laís Viana Bruneli, Ana Terra Bravim dos Santos, Leonard Campos Avellar Machado, Rony Mendes Rodrigues, Sara de Oliveira Olimpio, Willian Moreira da Costa, Atanásio Alves do Amaral, Esteffany Pereira da Silva, Oseas de Almeida Lima, Maurício Novaes Souza

CAPÍTULO 3..... 104

Sistemas de produção integrados como estratégia para o conforto térmico e a sustentabilidade na bovinocultura leiteira

Isabela Berbert da Guia, Krisley Camila Morais Lopes, Aparecida de Fátima Madella de Oliveira, Carla Sardinha de Oliveira, Willian Moreira da Costa, Atanásio Alves do Amaral, Maurício Novaes Souza

CAPÍTULO 4..... 131

Integração de estratégias sustentáveis: Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e Sistemas Agroflorestais (SAFs) como alternativas ao enfrentamento da degradação ambiental

Jainny Juliany Mathias das Neves, Lessa Braz Lopes, Jodielli Santana de Andrade, Jozimara Teixeira de Souza, Fernanda Barcelos de Paula, Willian Moreira da Costa, Atanásio Alves do Amaral, Maurício Novaes Souza

CAPÍTULO 5..... 175

Uso de resíduos orgânicos na formulação de substratos para a produção de mudas de espécies florestais nativas da Mata Atlântica

Gabriel Souza Mendonça, Rony Mendes Rodrigues, Sara de Oliveira Olimpio, Ana Terra Bravim dos Santos, Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira, Willian Moreira da Costa, Atanásio Alves do Amaral, Maurício Novaes Souza

CAPÍTULO 6..... 198

Potencial de óleos essenciais no controle de Colletotrichum em pós-colheita

Naianni de Sillis Rezende, Sara de Oliveira Olimpio, Rony Mendes Rodrigues, Ana Terra Bravim dos Santos, Willian Moreira da Costa, Atanásio Alves do Amaral, Maurício Novaes Souza

CAPÍTULO 7..... 233

Incidência de Streptococcus agalactiae e estratégias de controle sanitário na tilapicultura: diagnósticos e perspectivas para o sul do Espírito Santo

Erivelto Oliveira de Souza, Lucas de Brites Senra, Maclene Rodrigues Zeferino, Pedro Pierro Mendonça, Willian Moreira da Costa, Atanásio Alves do Amaral, Maurício Novaes Souza

CAPÍTULO 8..... 274

Qualidade físico-química e microbiológica da água em bebedouro e poço artesiano em Alegre–ES: uma análise comparativa

Daniela Fosse Valbao, Kamilla Matos Boldrini, Carla Sardinha de Oliveira, Isabela Berbert da Guia, Willian Moreira da Costa, Atanásio Alves do Amaral, Maurício Novaes Souza

CAPÍTULO 9..... 301

Levantamento de indicadores econômicos e de contratos municipais de serviços de limpeza urbana do estado do Espírito Santo

Marcos Willians Campos de Almeida, Bruna Chaves Amaral, Welington Moreira da Silva, Dâmaris de Souza Guimarães, Salomão Martins de Carvalho Júnior, Maurício Novaes Souza

CAPÍTULO 10.....	352
-------------------------	------------

Educação inclusiva e agroecologia: construindo caminhos de acessibilidade metodológica no ensino de ciências da natureza

Raquel Sueleni Cardoso Mariano, Krisley Camila Moraes Lopes, Tamiris da Silva Gumiere, Willian Moreira da Costa, Atanásio Alves do Amaral, Clarissa Alves de Novaes, Gabriela Alves de Novaes, Maurício Novaes Souza

CONSIDERAÇÕES FINAIS	372
-----------------------------------	------------

CAPÍTULO 1

Gestão ambiental e as dimensões da sustentabilidade agroecológica

Maurício Novaes Souza, Willian Moreira da Costa, Atanásio Alves do Amaral, Tamiris da Silva Gumiere, Leonard Campos Avellar Machado, Silvia Aline Bérghamo Xavier, Isabela Berbert da Guia, Ana Terra Bravim dos Santos, Déborah Sampaio de Almeida

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-45-9.c1>

Resumo

A agroecologia se apresenta como uma abordagem integrada que promove benefícios ambientais, sociais e econômicos, contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. No âmbito ambiental, destaca-se o papel da matéria orgânica do solo na melhoria de atributos físicos, químicos e biológicos, favorecendo o aumento do carbono orgânico, da atividade microbiana e da fertilidade. Práticas como diversificação de culturas, adubação verde e cobertura do solo contribuem para a redução da erosão, melhor uso da água e maior resiliência dos agroecossistemas. Do ponto de vista social, a agroecologia fortalece vínculos comunitários, promove a segurança alimentar e valoriza o conhecimento tradicional, estimulando a cooperação e o protagonismo dos agricultores. Experiências como hortas comunitárias evidenciam a construção de redes de apoio e o empoderamento de grupos locais. No campo econômico, observa-se redução da dependência de insumos externos, diminuição de custos de produção e acesso a mercados diferenciados, impulsionados pela crescente demanda por alimentos saudáveis. Além disso, a agroecologia contribui para a economia circular, ao valorizar o reaproveitamento de recursos. Por fim, destaca-se sua relevância na mitigação das mudanças climáticas, ao promover práticas que conservam o solo, reduzem emissões e preservam a biodiversidade, consolidando-se como um caminho para o desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Resiliência. Matéria orgânica do solo. Economia circular. Segurança alimentar. Mudanças climáticas. Desenvolvimento rural.

1. Introdução

A gestão ambiental contemporânea tem sido desafiada a responder, de forma consistente, à crescente demanda por alimentos sem comprometer a integridade dos recursos naturais, especialmente em um contexto marcado pelas mudanças climáticas e pela degradação dos ecossistemas. Nesse cenário, o modelo de agricultura convencional, fortemente dependente de insumos sintéticos e baseados em sistemas monoculturais, tem evidenciado limitações importantes, como a perda de biodiversidade, a degradação do solo e a contaminação de recursos hídricos. Tais impactos indicam a necessidade de transição para modelos produtivos mais resilientes, que não se limitem à mitigação de danos, mas que promovam a restauração e o equilíbrio dos processos ecológicos.

Nesse contexto, a agroecologia se consolida como uma abordagem científica e prática que integra princípios ecológicos ao planejamento e manejo dos agroecossistemas. Diferentemente de soluções pontuais, fundamentadas apenas em insumos ou tecnologias isoladas, a agroecologia propõe uma visão sistêmica, na qual a biodiversidade funcional e as interações biológicas são centrais para a sustentabilidade da produção agrícola. Práticas como a diversificação de culturas, o uso de plantas de cobertura e a valorização dos processos naturais contribuem não apenas para a proteção do solo contra a erosão, mas também para a melhoria da infiltração de água, regulação do microclima e maior estabilidade produtiva ao longo do tempo.

Além dos benefícios ambientais, a abordagem agroecológica amplia o debate ao incorporar dimensões sociais e econômicas do desenvolvimento rural. Do ponto de vista social, favorece a segurança alimentar e fortalece o protagonismo das comunidades locais ao integrar conhecimentos tradicionais com bases científicas contemporâneas. No aspecto econômico, contribui para a redução da dependência de insumos externos, promovendo maior autonomia produtiva e estimulando formas de comercialização mais justas, como os circuitos curtos. Essa lógica de uso eficiente dos recursos disponíveis e valorização da biomassa local aproxima a produção agrícola dos princípios da economia circular.

Nesse contexto de ampliação conceitual, a agroecologia passa a incorporar também dimensões culturais, políticas e éticas, aprofundando sua compreensão como um paradigma de desenvolvimento. A dimensão cultural refere-se à valorização dos saberes locais, das práticas tradicionais e da identidade das comunidades rurais, reconhecendo que a agricultura é também expressão de modos de vida. Já a dimensão política evidencia o papel da agroecologia na construção de processos participativos, na autonomia dos agricultores e na disputa por políticas públicas mais justas e inclusivas. No ápice desse conjunto, a dimensão ética orienta as relações entre sociedade, natureza e produção, fundamentando-se em princípios de responsabilidade socioambiental, equidade e respeito à vida em todas as suas formas, consolidando a agroecologia como uma proposta não apenas técnica, mas também civilizatória (Figura 1).

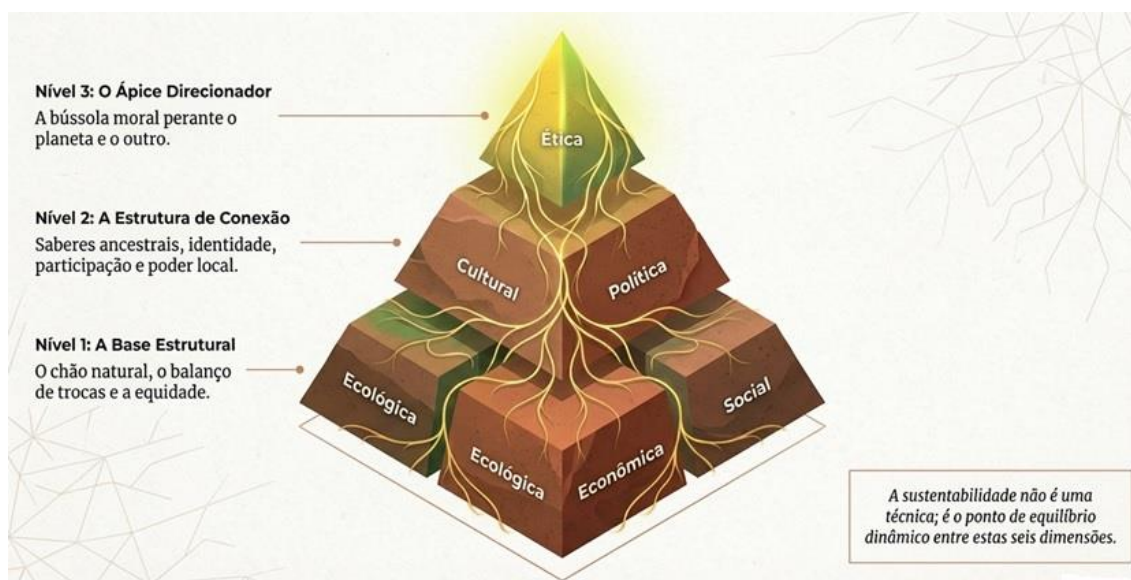


Figura 1. Abordagens da agroecologia: representação triangular das dimensões ambiental, social, econômica, cultural, política e ética. Fonte: elaborado por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Um dos fundamentos dessa abordagem reside na manutenção da saúde do solo, entendido como elemento central na provisão de serviços ecossistêmicos. A gestão agroecológica prioriza o equilíbrio da biota edáfica, o aumento da matéria orgânica e o sequestro de carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Nesse sentido, o solo deixa de ser visto apenas como suporte físico para as plantas e passa a ser compreendido como

um sistema vivo e dinâmico, essencial para a estabilidade e a sustentabilidade dos agroecossistemas.

Dessa forma, a compreensão da gestão ambiental sob a ótica agroecológica requer uma análise integrada dos componentes que sustentam a vida no campo. Entre esses, destaca-se a biomassa e seus processos de transformação, que exercem papel determinante na ciclagem de nutrientes, na estruturação do solo e na regulação da fertilidade. Assim, o aprofundamento desse tema passa, necessariamente, pela análise da matéria orgânica do solo como indicador-chave da qualidade e funcionalidade de sistemas produtivos orientados pelos princípios da sustentabilidade.

2. Matéria orgânica do solo e qualidade em sistemas agroecológicos

A matéria orgânica do solo (MOS) desempenha papel central na manutenção e na melhoria da qualidade dos solos, influenciando diretamente seus atributos químicos, físicos e biológicos (Figura 2).



Figura 2. Comparativo visual entre solo degradado (baixa MOS) e solo estruturado (alta MOS), evidenciando os benefícios aos atributos edáficos. Fonte: elaborado por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Sua presença está associada à maior capacidade de retenção de água, à estabilidade estrutural e à disponibilidade de nutrientes, além de favorecer a atividade da microbiota edáfica. Nesse sentido, a avaliação da MOS e de suas frações constitui uma importante ferramenta para o monitoramento da qualidade

do solo e para a análise dos impactos decorrentes dos diferentes sistemas de manejo agrícola.

Em sistemas conduzidos sob princípios agroecológicos, observa-se, de modo geral, maior aporte de resíduos orgânicos e intensificação da atividade biológica, fatores que contribuem para o aumento dos estoques de carbono no solo e para a melhoria de sua fertilidade. Indicadores como carbono orgânico do solo, nitrogênio total e biomassa microbiana tornam-se, portanto, essenciais para a compreensão das dinâmicas ecológicas e produtivas desses sistemas. Parte-se, assim, da hipótese de que o tempo de adoção do manejo agroecológico favorece a manutenção ou a melhoria da qualidade do solo, refletindo-se no incremento desses atributos (Figura 3).



Figura 3. Comparativo entre as limitações do modelo agrícola convencional e as vantagens ecossistêmicas e econômicas da transição agroecológica. Fonte: elaboração própria (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Sob essa perspectiva, o solo deixa de ser compreendido apenas como suporte físico para as plantas e passa a ser reconhecido como um sistema vivo, dinâmico e interdependente. A adoção de práticas que respeitam os processos ecológicos, como a diversificação de culturas e o uso de insumos orgânicos contribui para a construção de ambientes mais equilibrados. Nesses sistemas, a interação entre plantas, microrganismos e fauna do solo promove condições favoráveis ao desenvolvimento vegetal e à estabilidade dos agroecossistemas.

Ao reduzir a dependência de insumos químicos e estimular a biodiversidade, a agroecologia favorece a autorregulação dos sistemas produtivos. A diversidade de espécies cultivadas amplia as interações ecológicas, contribuindo para o controle natural de pragas e doenças, além de promover maior resiliência frente a variações ambientais. Dessa forma, a valorização da matéria orgânica do solo e dos processos biológicos associados configura-se como um dos pilares fundamentais para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

3. Serviços ecossistêmicos em sistemas agroecológicos

A observação de sistemas conduzidos sob princípios agroecológicos permite compreender, de forma concreta, os efeitos positivos dessas práticas sobre o ambiente e sobre a relação entre o agricultor e a terra (Figura 4).

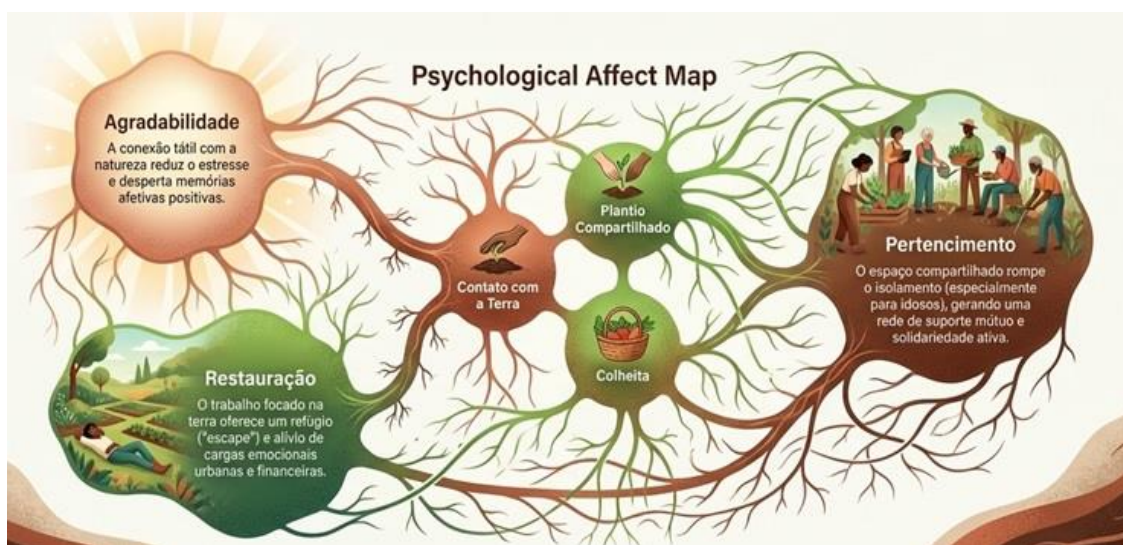


Figura 4. Mapa afetivo representando os serviços ecossistêmicos culturais, tais como pertencimento, restauração, satisfação com a colheita e bem-estar subjetivo. Fonte: elaborado por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Em propriedades que adotam esse modelo, é possível identificar sinais claros de recuperação ecológica, como maior atividade biológica no solo, presença de fauna associada e diversidade de cultivos. Esses elementos indicam não apenas a melhoria das condições produtivas, mas também o

restabelecimento de interações ecológicas essenciais ao equilíbrio dos agroecossistemas.

Entre os benefícios ambientais, destaca-se a redução dos processos erosivos, especialmente em cenários marcados por eventos climáticos intensos. Práticas como o cultivo consorciado, a manutenção de cobertura vegetal e o uso de resíduos orgânicos sobre o solo contribuem para aumentar a infiltração de água, reduzir o escoamento superficial e preservar as camadas mais férteis do solo. Esses manejos favorecem a conservação da estrutura do solo e sua capacidade de retenção hídrica, aspectos fundamentais para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Figura 5).



Figura 5. Benefícios ambientais: redução da erosão e conservação do solo.
Fonte: elaborado por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (Chat GPT).

Adicionalmente, a agroecologia promove maior eficiência no uso da água, seja por meio da melhoria das propriedades físicas do solo, seja pela adoção de práticas de manejo que aperfeiçoam a disponibilidade hídrica para as plantas. Em um contexto de crescente escassez de recursos hídricos, essas estratégias tornam-se ainda mais relevantes, contribuindo para a adaptação dos sistemas produtivos às mudanças climáticas.

Enfim, a adoção de práticas agroecológicas evidencia a necessidade de uma abordagem mais integrada e responsável na produção de alimentos. Mais

do que garantir produtividade, esse modelo reforça a importância de estabelecer uma relação equilibrada entre sociedade e natureza, reconhecendo a interdependência entre os sistemas produtivos e os processos ecológicos. Nesse sentido, a agroecologia se consolida como um caminho promissor para a construção de sistemas agrícolas mais sustentáveis, resilientes e alinhados aos desafios ambientais contemporâneos.

4. Benefícios sociais da agroecologia: fortalecimento comunitário e segurança alimentar

A agroecologia transcende a dimensão produtiva ao se constituir como um importante vetor de transformação social e fortalecimento das comunidades rurais e urbanas. Seus benefícios sociais estão diretamente relacionados à melhoria da qualidade de vida, à promoção da segurança alimentar e à valorização das relações humanas no processo produtivo. Nesse contexto, a produção de alimentos por meio de práticas agroecológicas não apenas amplia o acesso a alimentos saudáveis, mas também contribui para a reconstrução de vínculos sociais e para o fortalecimento do tecido comunitário.

Experiências como hortas comunitárias ilustram de forma concreta esse processo. Iniciativas coletivas de cultivo favorecem a troca de conhecimentos, a cooperação e o aprendizado mútuo entre os participantes. O espaço produtivo passa, assim, a desempenhar também uma função social, tornando-se ambiente de convivência, partilha e construção de saberes. A interação entre diferentes gerações e experiências contribui para a valorização tanto dos conhecimentos tradicionais quanto das inovações contemporâneas.

Além disso, a agroecologia exerce papel relevante no empoderamento de comunidades, especialmente aquelas em situação de vulnerabilidade. Ao estimular a produção local de alimentos, reduz a dependência de mercados externos e fortalece a autonomia das famílias. Esse processo está diretamente associado ao aumento da segurança alimentar, à diversificação da dieta e à melhoria das condições nutricionais (Figura 6).

Outro aspecto fundamental refere-se à formação de redes de apoio e solidariedade. A prática agroecológica favorece a organização coletiva,

incentivando a cooperação entre agricultores e a construção de estratégias conjuntas para enfrentar desafios produtivos e sociais. Dessa forma, a agroecologia contribui não apenas para a produção de alimentos, mas para a construção de comunidades mais resilientes, solidárias e socialmente fortalecidas.



Figura 6. Representação do ciclo virtuoso da segurança alimentar, integrando solos regenerados, a produção familiar autônoma, as redes de compras públicas inteligentes e as comunidades. Fonte: elaborado por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

5. Construção coletiva do conhecimento e fortalecimento sociocultural na agroecologia

As iniciativas agroecológicas se configuram como espaços privilegiados de construção e compartilhamento de saberes, nos quais o diálogo intergeracional assume papel central. Nesse contexto, conhecimentos tradicionais, acumulados ao longo de décadas de experiência no manejo da terra, coexistem e interagem com inovações técnicas contemporâneas, promovendo um processo dinâmico de aprendizagem coletiva. Essa integração entre diferentes formas de conhecimento contribui não apenas para o aprimoramento das práticas produtivas, mas também para o fortalecimento das identidades culturais e dos vínculos comunitários.

A agroecologia, nesse sentido, ultrapassa os limites da produção agrícola, consolidando-se como um instrumento de transformação social. Ao promover práticas baseadas na cooperação, na equidade e no respeito aos ciclos naturais, ela atua diretamente na redução das desigualdades e na valorização dos sujeitos historicamente marginalizados no meio rural. A relação com a terra deixa de ser estritamente utilitária e passa a incorporar dimensões éticas, culturais e simbólicas, reforçando o compromisso com a sustentabilidade e com o bem-estar coletivo (Figura 7).

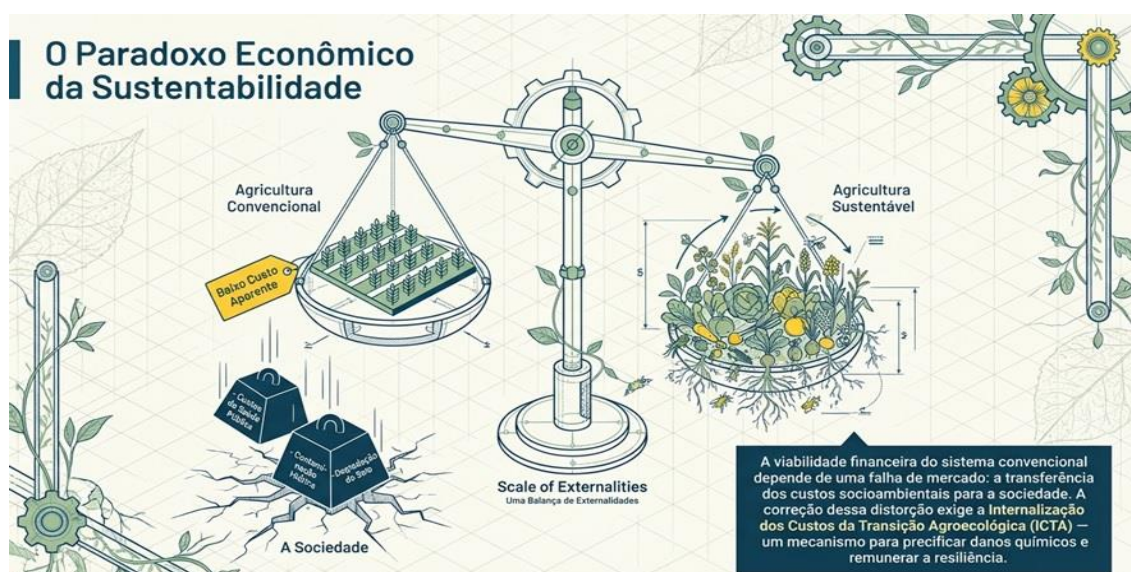


Figura 7. O paradoxo econômico da sustentabilidade. Fonte: elaborado por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Além disso, a reflexão sobre os modos de produção e consumo de alimentos amplia a consciência crítica dos indivíduos acerca de seu papel nos sistemas socioecológicos. A produção de alimentos passa a ser compreendida como um ato político e social, que envolve escolhas capazes de impactar tanto o ambiente quanto as relações sociais. Dessa forma, a agroecologia contribui para a formação de sujeitos mais conscientes, capazes de intervir de maneira responsável em seus territórios.

Afinal, evidencia-se que a agroecologia constitui um convite à ação coletiva, fundamentado na construção de redes de solidariedade e no fortalecimento da resiliência comunitária. Ao articular produção, cultura e organização social, essa abordagem possibilita não apenas a geração de alimentos, mas também a

construção de projetos de vida mais dignos e sustentáveis. Trata-se, portanto, de um processo contínuo de transformação, no qual a esperança se materializa na capacidade de reconstruir, de forma integrada, as relações entre sociedade e natureza.

6. Dinâmicas econômicas e geração de valor na agroecologia

A análise dos benefícios econômicos da agroecologia revela um campo dinâmico no qual se articulam eficiência produtiva, redução de custos e geração de novas oportunidades de mercado. Agricultores em processo de transição frequentemente relatam que, embora a fase inicial demande investimento em conhecimento e adaptação de práticas, os resultados tendem a se expressar na diminuição da dependência de insumos externos, especialmente fertilizantes sintéticos e agrotóxicos. Essa reconfiguração do sistema produtivo contribui para maior autonomia econômica, reduzindo a exposição às oscilações de preços e aos custos ocultos associados ao modelo convencional.

Além da redução de custos, a agroecologia amplia o acesso a mercados diferenciados, impulsionados por uma crescente demanda por alimentos saudáveis, produzidos de forma sustentável e socialmente justa. Consumidores mais conscientes passam a valorizar atributos como origem, qualidade e modo de produção, criando nichos que favorecem a comercialização direta e circuitos curtos de comercialização. Nesse contexto, produtos agroecológicos tendem a alcançar maior valorização, não apenas pelo seu valor nutricional, mas também pelo conjunto de valores socioambientais que incorporam (Figura 8).

Essa transformação econômica não se restringe ao âmbito da produção, mas envolve também uma mudança na lógica de consumo. Ao optar por alimentos oriundos de sistemas agroecológicos, os consumidores participam ativamente de um modelo que fortalece economias locais, estimula práticas sustentáveis e promove maior equidade nas relações comerciais. Dessa forma, estabelece-se uma conexão mais transparente e ética entre quem produz e quem consome, ressignificando o ato de compra como uma prática social e política.

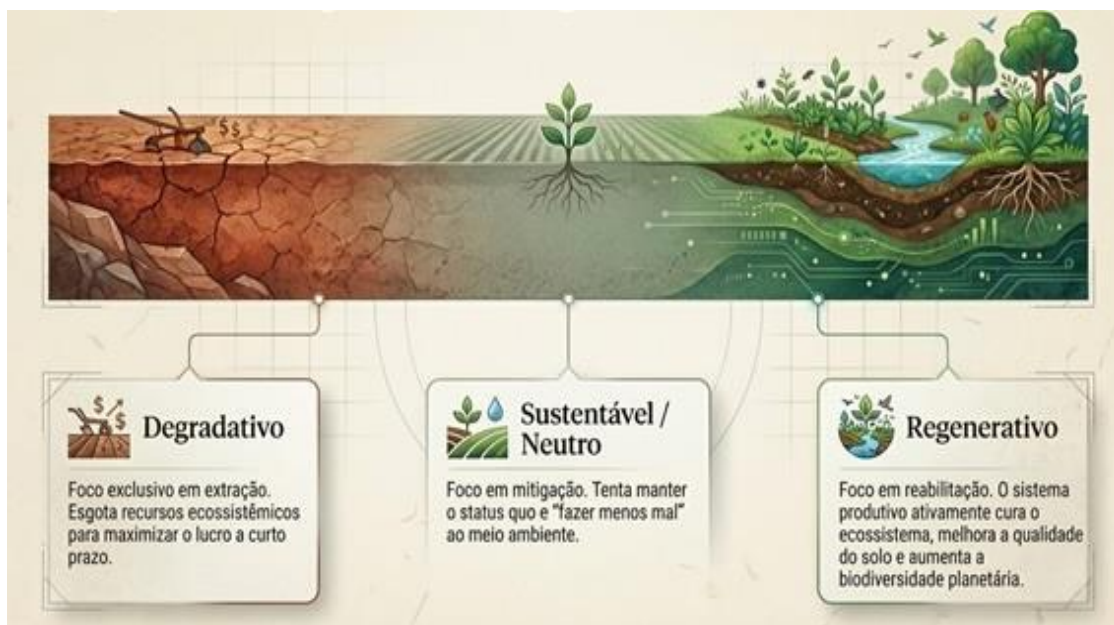


Figura 8. Estágios da regeneração e agregação de valor socioambiental. Fonte: elaborado por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A concretude da transformação agroecológica manifesta-se em iniciativas de gestão coletiva, como o cooperativismo e a agricultura urbana comunitária. Tais espaços atuam como polos de resistência e inovação social, demonstrando que baixas intensidades de capital podem resultar em altos índices de bem-estar coletivo. Ao reconstruir a relação entre o produtor e o seu meio, essas práticas resgatam a dimensão humana das trocas econômicas, substituindo a lógica da competição pela ética da cooperação. O resultado é uma infraestrutura econômica regenerativa, capaz de sustentar comunidades de forma autônoma, digna e ambientalmente integrada.

7. Economia circular, consumo consciente e reconfiguração dos sistemas produtivos

A incorporação dos princípios da economia circular no contexto da agroecologia evidencia uma mudança paradigmática na forma de compreender os processos produtivos. Ao valorizar o reaproveitamento de recursos e a ciclagem de nutrientes, práticas como a compostagem, o uso de resíduos orgânicos e a integração entre componentes do sistema produtivo passam a desempenhar papel central na sustentabilidade dos agroecossistemas. Nesse

modelo, resíduos deixam de ser compreendidos como passivos ambientais e passam a constituir insumos estratégicos, contribuindo para o fechamento de ciclos e para a redução da dependência de insumos externos (Figura 9).

A abordagem aqui delineada desafia a visão mecanicista que reduz a natureza a um estoque de recursos, opondo-se ao fluxo linear de desperdício que caracteriza a modernidade industrial. A proposta é uma reorganização vital da produção, onde a eficiência não é medida apenas pelo rendimento, mas pela capacidade de regeneração da vida. Ao harmonizar a produção com os ritmos da biosfera, a agroecologia devolve ao agricultor o protagonismo sobre seu território, transformando a redução de custos operacionais em liberdade econômica e segurança social para as famílias rurais.

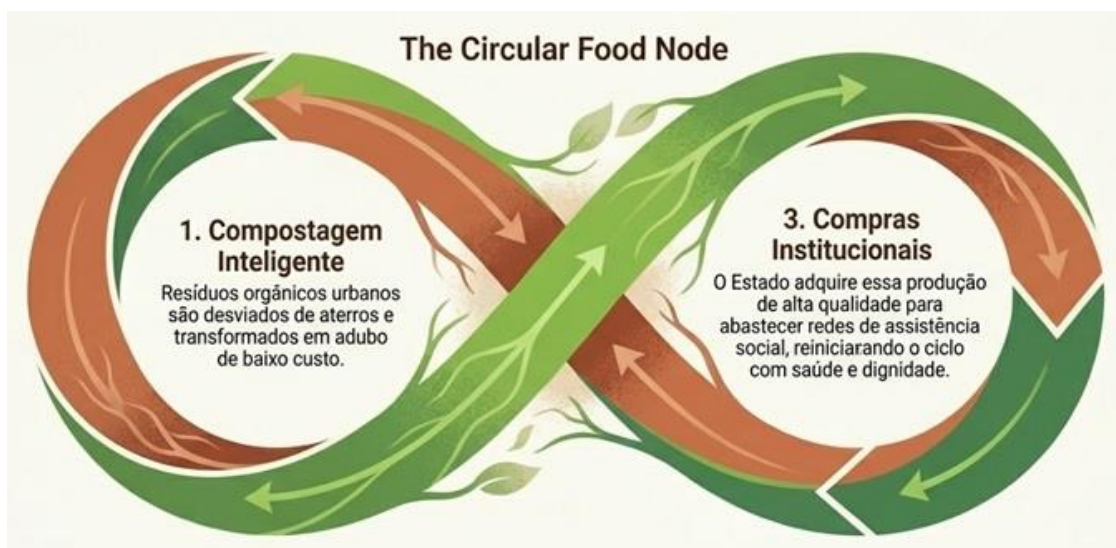


Figura 9. Economia circular: fechando o ciclo entre cidade e o campo. Fonte: elaborado por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Entretanto, essa transformação não se limita à esfera produtiva, estendendo-se ao campo do consumo. A escolha por produtos agroecológicos implica o reconhecimento do papel ativo dos consumidores na configuração dos sistemas alimentares. Ao priorizar circuitos curtos de comercialização e produtos de origem local, fortalece-se a economia regional, valoriza-se o trabalho dos agricultores e estimula-se a adoção de práticas mais sustentáveis. Nesse sentido, o consumo deixa de ser um ato meramente econômico e passa a assumir dimensão ética e política.

Diante desse cenário, a transição para modelos baseados na economia circular e na agroecologia representa tanto um desafio quanto uma oportunidade. Trata-se de um processo que exige mudanças de comportamento, revisão de valores e abertura para novas formas de produzir e consumir. Ao reconhecer que cada escolha individual possui impactos coletivos, consolida-se a compreensão de que a construção de sistemas mais sustentáveis depende da ação integrada entre produtores, consumidores e sociedade. Assim, a agroecologia se afirma como um caminho viável para a construção de um futuro mais equilibrado, no qual desenvolvimento econômico, justiça social e integridade ambiental caminham de forma indissociável.

8. Agroecologia, mudanças climáticas e sustentabilidade global

A agroecologia, ao integrar princípios ecológicos aos sistemas produtivos, estabelece uma relação direta com os desafios contemporâneos da sustentabilidade global e da mitigação das mudanças climáticas. Mais do que um conjunto de práticas agrícolas, configura-se como uma abordagem sistêmica que redefine a interação entre sociedade e natureza, promovendo formas de uso da terra baseadas na conservação dos recursos naturais, na resiliência dos agroecossistemas e na redução dos impactos ambientais. Nesse sentido, cada prática agroecológica, do manejo do solo à diversificação de culturas, contribui para a construção de sistemas mais equilibrados e adaptados às mudanças climáticas.

A adoção de sistemas diversificados, com redução ou eliminação de insumos químicos, favorece a recuperação da biodiversidade funcional e o fortalecimento dos serviços ecossistêmicos, como a polinização, o controle biológico de pragas e a ciclagem de nutrientes. Além disso, o aumento do teor de matéria orgânica no solo promove maior sequestro de carbono, contribuindo diretamente para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Esses processos reforçam a capacidade dos sistemas produtivos de resistir a eventos climáticos extremos, como secas prolongadas e chuvas intensas, ampliando sua estabilidade e produtividade ao longo do tempo (Figura 10).

No espectro do consumo consciente, a agroecologia emerge como um pilar estratégico para a viabilização de sistemas alimentares regenerativos. Ao privilegiar circuitos curtos de comercialização e o protagonismo da produção local, essa abordagem mitiga as externalidades negativas advindas das extensas cadeias logísticas e do processamento industrial intensivo. Mais do que uma escolha de mercado, o ato de consumir torna-se um gesto de corresponsabilidade: o cidadão transmuta-se em agente político, cuja demanda por alimentos cultivados com ética socioambiental catalisa a transição para modelos produtivos que respeitam os limites ecossistêmicos e revitalizam as economias territoriais.



Figura 10. Solo rico em matéria orgânica como base da resiliência e dos serviços ecossistêmicos: em 1 m² de solo, há 2x mais C estocado que na atmosfera e 3x mais que na biosfera (Cerri, 2023). Fonte: elaborado por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Por conseguinte, a agroecologia consolida-se como uma resposta imperativa e robusta frente às crises civilizatórias contemporâneas. Ao integrar harmonicamente a práxis produtiva, a salvaguarda da biodiversidade e os imperativos da justiça social, tal paradigma não apenas contribui para o enfrentamento da emergência climática, mas propõe uma refundação dos sistemas alimentares. Esta nova arquitetura é orientada pela ética do cuidado,

pela equidade distributiva e por um profundo reconhecimento da alteridade e da diversidade biológica como fundamentos da vida em comum.

9. Consumo responsável, ética ambiental e transformação cotidiana

A aproximação entre produção e consumo, evidenciada nas práticas agroecológicas, contribui para a construção de uma consciência ambiental mais crítica e reflexiva. Experiências individuais, como o cultivo de hortas domésticas, revelam que o contato direto com os ciclos naturais favorece a compreensão dos processos ecológicos e amplia o senso de responsabilidade em relação aos impactos das ações humanas sobre o ambiente. Nesse contexto, a alimentação deixa de ser compreendida apenas como necessidade biológica e passa a ser reconhecida como expressão de valores, escolhas e posicionamentos diante das questões socioambientais.

A agroecologia também promove uma revisão do conceito de abundância, deslocando-o de uma lógica quantitativa, centrada na maximização da produção, para uma perspectiva qualitativa, baseada na sustentabilidade e na eficiência ecológica. A valorização de práticas como o reaproveitamento de resíduos, a ciclagem de nutrientes e a diversificação produtiva evidencia que a geração de riqueza não está necessariamente associada ao aumento da produção, mas à capacidade de utilizar os recursos de forma equilibrada e inteligente. Essa abordagem reforça os princípios da economia circular e amplia as possibilidades de inovação nos sistemas produtivos.

No âmbito do cotidiano, as escolhas de consumo assumem papel estratégico na consolidação de sistemas alimentares mais sustentáveis. A decisão por adquirir produtos locais, sazonais e oriundos de práticas agroecológicas representa uma forma concreta de apoio a modelos produtivos comprometidos com a conservação ambiental e a justiça social. Assim, o ato de consumir passa a ser compreendido como uma prática consciente, capaz de influenciar diretamente a organização dos sistemas de produção e distribuição de alimentos.

A interconexão entre agroecologia e sustentabilidade materializa-se de forma mais concreta quando observada à luz dos cinco níveis de evolução dos

agroecossistemas propostos por Gliessman (Figura 11). Esses níveis evidenciam que a transição agroecológica não ocorre de maneira abrupta, mas como um processo gradual, que se inicia com a melhoria da eficiência no uso de insumos, avança para a substituição de práticas convencionais por alternativas mais sustentáveis, passa pela reorganização ecológica dos sistemas produtivos e culmina na reconfiguração das relações entre produção e consumo.

Nesse percurso, a práxis coletiva ganha centralidade, pois envolve desde decisões técnicas no campo até mudanças nos padrões de consumo da sociedade. Assim, as microações cotidianas, quando articuladas entre diferentes atores, tornam-se forças estruturantes capazes de promover transformações sistêmicas, demonstrando que a construção de agroecossistemas resilientes é, ao mesmo tempo, um compromisso ético e uma possibilidade técnica efetiva.

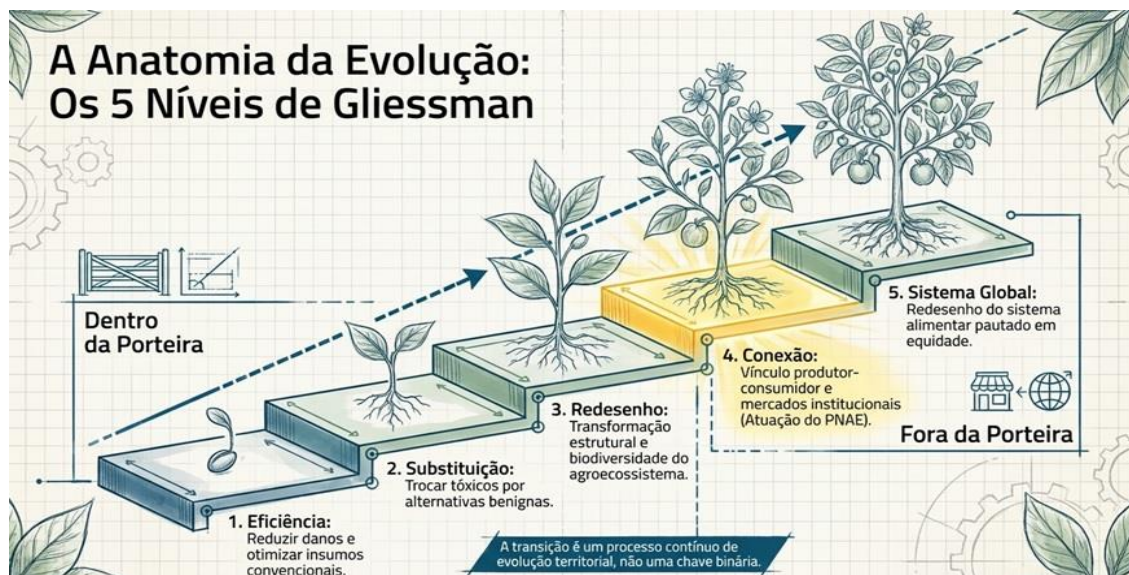


Figura 11. Evolução dos agroecossistemas: as etapas de conversão baseadas nos níveis de Gliessman. Fonte: elaborado por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A análise da Figura 11 evidencia que a transição agroecológica deve ser compreendida como um processo gradual e sistêmico, no qual mudanças técnicas, ecológicas e sociais se articulam de forma integrada. Os níveis de evolução dos agroecossistemas não representam etapas isoladas, mas um *continuum* de transformação que envolve desde o manejo eficiente de insumos até a reconfiguração das relações entre produção, ambiente e sociedade. Nesse

sentido, a figura reforça que a sustentabilidade não decorre de intervenções pontuais, mas de uma reorganização progressiva dos sistemas produtivos, baseada no equilíbrio ecológico, na valorização dos saberes locais e na construção de práticas resilientes ao longo do tempo.

10. Considerações

A análise dos múltiplos benefícios da agroecologia evidencia que essa abordagem ultrapassa os limites da produção agrícola, consolidando-se como um modelo de gestão ambiental integrada. Ao articular as dimensões ambientais, sociais, econômicas e culturais, a agroecologia permite uma governança dos recursos naturais que harmoniza a conservação ecossistêmica com a viabilidade produtiva. Nesse sentido, o manejo sustentável do solo, o incremento da biodiversidade e a mitigação climática deixam de ser ações isoladas para se tornarem indicadores de uma sustentabilidade agroecológica sistêmica e resiliente.

No campo social, a agroecologia atua como um vetor de justiça e equidade, valorizando saberes tradicionais e fortalecendo o tecido comunitário. A construção coletiva do conhecimento e a organização social dos agricultores são pilares fundamentais dessa gestão, garantindo que a segurança alimentar e a inclusão social sejam indissociáveis do processo produtivo, especialmente em territórios vulneráveis.

Sob a perspectiva econômica, a autonomia conquistada pela redução da dependência de insumos externos e pelo fortalecimento dos circuitos curtos de comercialização reflete uma gestão eficiente e estratégica. A incorporação dos princípios da economia circular não apenas otimiza o uso dos recursos, mas redefine a eficiência produtiva sob a ótica da regeneração e da inovação territorial.

Por fim, destaca-se que a agroecologia representa um paradigma de desenvolvimento onde a gestão ambiental se fundamenta na ética das relações entre sociedade e natureza. Sua consolidação como modelo de sustentabilidade plena depende do engajamento coletivo e da capacidade de adaptação às realidades locais. Assim, a agroecologia se afirma como o caminho mais

promissor para a governança de sistemas alimentares que sejam, simultaneamente, resilientes, equitativos e profundamente comprometidos com a integridade da vida.

11. Referências consultadas¹

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

AGENDA **GÖTSCH**. Disponível em: <https://agendagotsch.com/en/?s=sintropia>. Acesso: 10 ago. 2022.

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

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

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

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

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

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

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

CRESPO, A. M.; SOUZA, M. N.; Silva, M. A. B. da. Ciclo do carbono e sistemas agroflorestais na sustentabilidade da produção agrícolas: revisão de literatura.

¹ A fundamentação teórica deste texto ampara-se em obras que considero essenciais para compreender a complexidade da agroecologia. Embora o texto flua de forma autoral, ele é fruto da consulta constante a estes saberes, que unem a ciência acadêmica à prática transformadora e vivenciada no campo.

INCAPER EM REVISTA, v. 13, p. 06-19, 2023. Home page: <https://editora.incaper.es.gov.br/incaper-em-revista>. DOI: 10.54682/ier.v.13e14.p06.19.

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

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

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

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

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

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

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

GONÇALVES, M. M.; EGIDIO, L. S.; OLIVEIRA, C. H. R. de; FIM, B. P.; COSTA, W. M. da; SOUZA, M. N. Análise integrada das práticas de manejo, cultivares e sistemas agroflorestais na Fazenda Experimental de Bananal do Norte (FEBN), Cachoeiro de Itapemirim, ES. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em gestão ambiental. Vol. IV**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. p. 149-172.

ISBN: 978-65-84548-36-7. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-36-7>.

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

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

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

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

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

MASSARIOL, B. P.; PERON, I. B.; NOVELLO, J. S.; LIMA, M. da S. P.; SOUZA, D. S. M. de; ADÃO, J. E. A.; COSTA, W. M. da; AZEVEDO, P. P. M.; MENON, M. M.; SOUZA, M. N. Três faces da sustentabilidade rural: agroecologia, agricultura orgânica e transição agroecológica. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em Cafeicultura Vol. V – Cafeicultura Agroecológica**. Canoas: Mérida Publishers, 2025, p. 52-92. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-35-0.c2>

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

SOUZA, M. N. **Mudanças no uso do solo e da água e a gestão dos recursos**

naturais. Frankfurt, Alemanha: Novas Edições Acadêmicas, 2015. 376 p.

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

WEZEL, A.; BELLON, S.; DORÉ, T.; FRANCIS, C.; VALLOD, D.; DAVID, C. Agroecology as a science, a movement and a practice. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 29, p. 503–515, 2009.

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

CAPÍTULO 2

Defesa vegetal em sistemas agroecológicos: fundamentos fisiológicos, microbiológicos e interações ecológicas

Daniel Schwan Monteiro de Sousa, Laís Viana Bruneli, Ana Terra Bravim dos Santos, Leonard Campos Avellar Machado, Rony Mendes Rodrigues, Sara de Oliveira Olimpio, Willian Moreira da Costa, Atanásio Alves do Amaral, Esteffany Pereira da Silva, Oseas de Almeida Lima, Maurício Novaes Souza

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-45-9.c2>

Resumo

Compreender os diferentes mecanismos de defesa das plantas frente a patógenos e insetos-praga implica considerar não apenas os processos fisiológicos e bioquímicos envolvidos, mas também as complexas interações ecológicas presentes em agroecossistemas de base agroecológica. Ao longo de sua evolução, as plantas desenvolveram estratégias sofisticadas de proteção contra a herbivoria, que incluem barreiras físicas, defesas químicas constitutivas e respostas induzidas, estas podendo atuar de forma direta ou indireta. Para além da abordagem clássica da fisiologia vegetal, torna-se fundamental estabelecer conexões com a agroecologia, evidenciando como práticas como a adubação orgânica, o uso de cobertura morta, a adubação verde, o consórcio de culturas e a conservação do solo contribuem para o fortalecimento dos sistemas naturais de defesa das plantas. Essas práticas favorecem a atividade da microbiota do solo, promovem maior equilíbrio ecológico e reduzem a dependência de insumos químicos, ampliando, assim, a resiliência dos agroecossistemas e contribuindo para uma agricultura mais sustentável. Nesse contexto, a teoria da trofobiose contribui para a compreensão de que o desequilíbrio nutricional das plantas pode aumentar sua suscetibilidade a pragas e doenças, reforçando a importância de práticas agroecológicas que promovam o equilíbrio metabólico e a saúde do solo.

Palavras-chave: Metabólitos Secundários. Resistência Induzida. Teoria da Trofobiose. Agroecologia. Sustentabilidade Agrícola.

1. Introdução

A busca por sistemas agrícolas mais equilibrados, sustentáveis e com menor dependência de insumos químicos tem se intensificado nos últimos anos, tornando fundamental a compreensão das interações entre os mecanismos de defesa das plantas e as práticas agrícolas. Ao favorecer os próprios mecanismos de defesa vegetal, práticas como o uso de adubação orgânica, cobertura do solo, consórcio de culturas e o manejo da biodiversidade contribuem para a redução do uso de agrotóxicos e para o fortalecimento da saúde das plantas (Aquino; Assis, 2012; Gonçalves, 2020; Souza, 2025). Nesse contexto, a planta deixa de ser apenas um alvo passivo de pragas e doenças e passa a atuar ativamente em sua própria proteção, inserida em um sistema produtivo mais sustentável.

Por serem organismos sésseis, as plantas, ao longo de sua evolução, desenvolveram mecanismos de defesa complexos para se proteger contra organismos nocivos, como patógenos (fungos, bactérias e vírus), insetos-praga e estresses abióticos (ex.: seca, radiação UV). Esses mecanismos são essenciais para sua sobrevivência e podem ser classificados em dois grandes grupos: defesas constitutivas (presentes mesmo na ausência de ameaças); e defesas induzidas (ativadas após o reconhecimento do perigo) (Fernandes *et al.*, 2009; Mithöfer; Boland, 2012).

A camada externa da planta atua como a primeira barreira contra organismos potencialmente nocivos. A cutícula (película cerosa externa), a epiderme e outras estruturas físicas contribuem para impedir a invasão de bactérias, fungos e insetos. A segunda linha de defesa envolve, em geral, mecanismos bioquímicos, que podem ser constitutivos ou induzidos. As defesas constitutivas permanecem continuamente ativas, enquanto as induzidas são ativadas em resposta ao ataque. Diferentemente das constitutivas, as defesas induzidas dependem de sistemas específicos de detecção e de vias de transdução de sinal, capazes de reconhecer o agente agressor e, em consequência, modular a expressão gênica e o metabolismo (Taiz *et al.*, 2017).

As defesas constitutivas incluem tanto barreiras físicas quanto a produção de metabólitos secundários com ação antimicrobiana, como fenóis, alcaloides e terpenoides (incluindo lactonas), que podem intoxicar ou repelir os agressores (Stangarlin *et al.*, 2011). Já as defesas induzidas são acionadas após o contato

com o patógeno e envolvem diferentes níveis de resposta (Garción; Lamotte; Métraux, 2007):

- ✓ Respostas locais, como a resposta hipersensível (RH), caracterizada pela morte celular programada com o objetivo de isolar o invasor;
- ✓ Respostas sistêmicas, como a resistência sistêmica adquirida (RSA) e a resistência sistêmica induzida (RSI), mediadas por hormônios como o ácido salicílico e o ácido jasmônico/etileno, respectivamente;
- ✓ Além da produção de proteínas relacionadas à patogênese (PR-proteínas), como quitinases, defensinas e peroxidases, que atuam diretamente no combate aos patógenos.

Além disso, as plantas podem apresentar modificações morfológicas induzidas pela ação de pragas, como a formação de galhas. No entanto, essas alterações nem sempre são consideradas mecanismos de defesa ativa, sendo frequentemente interpretadas como resultado da manipulação exercida pelo organismo agressor (Bergamin Filho; Kimati; Amorim, 1995).

Diante desse contexto, torna-se relevante aprofundar a compreensão dos mecanismos de defesa das plantas, não apenas sob a perspectiva da fisiologia vegetal, mas também em sua interface com práticas agrícolas sustentáveis. Tal abordagem permite reconhecer o papel desses mecanismos na construção de sistemas produtivos mais resilientes, nos quais a integração entre processos biológicos e manejo agroecológico contribui para a promoção da saúde das plantas e para a sustentabilidade dos agroecossistemas.

2. Defesas constitutivas

As defesas constitutivas correspondem aos mecanismos de proteção inerentes às plantas, presentes mesmo na ausência de ataque por patógenos ou insetos-praga, desempenhando papel fundamental na prevenção da colonização por organismos nocivos. Essas defesas incluem tanto barreiras físicas, como a cutícula espessa, a parede celular lignificada e estruturas epidérmicas, quanto compostos químicos produzidos continuamente, como metabólitos secundários com propriedades antimicrobianas e repelentes. Por estarem permanentemente ativas, essas estratégias representam a primeira linha de defesa vegetal,

contribuindo para reduzir a necessidade de respostas induzidas e, consequentemente, o gasto energético associado a processos de defesa mais complexos.

2.1. Barreiras estruturais

As barreiras estruturais são mecanismos de defesa constitutivos, ou seja, estão presentes na planta mesmo na ausência de patógenos ou pragas. Essas estruturas atuam como a primeira linha de defesa, dificultando fisicamente a penetração e o estabelecimento de agentes invasores, como fungos, bactérias e insetos. Além da proteção, desempenham funções essenciais em processos fisiológicos, como regulação hídrica, trocas gasosas e proteção contra estresses abióticos (ex.: radiação UV e perda excessiva de água). A seguir, serão descritas as características de algumas dessas barreiras mecânicas, bem como seus respectivos mecanismos de atuação na defesa vegetal (Figura 1).

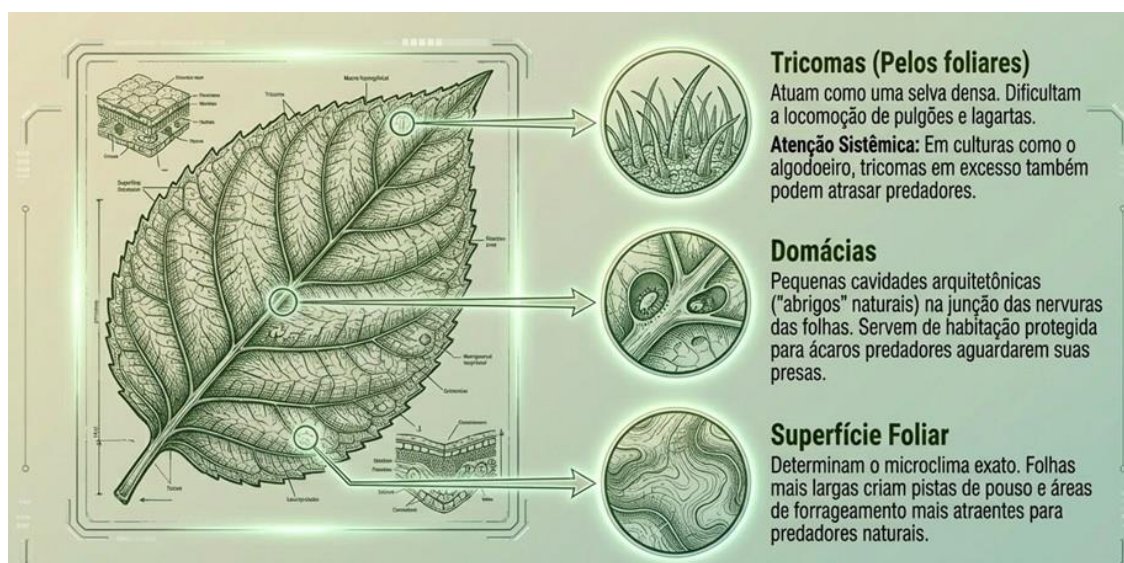


Figura 1. Barreiras estruturais constitutivas e a morfologia defensiva vegetal. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

2.1.1. Cutícula

A cutícula vegetal é uma camada cerosa e impermeabilizante que recobre as folhas, estando presente também em caules jovens das plantas (Figura 2).

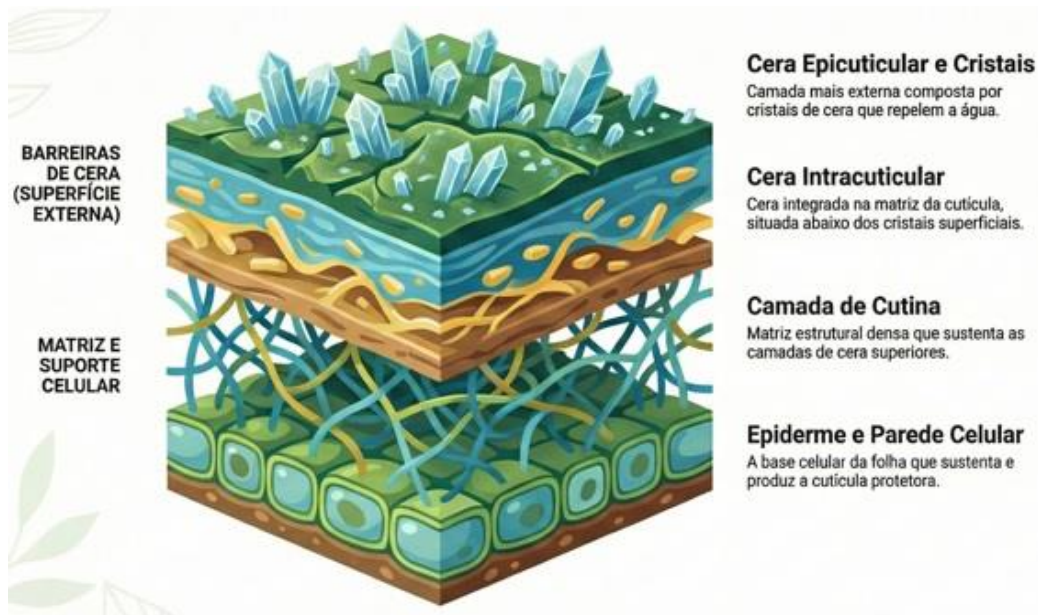


Figura 2. Estrutura da cutícula vegetal: barreiras químicas e físicas de proteção.
Fonte: elaboração própria (2026) a partir de Stangarlin *et al.* (2011), com auxílio de IA (NotebookLM).

Composta por materiais hidrofóbicos, sua principal função é reduzir a perda de água na superfície da parte aérea. Além de atuar como uma barreira contra a desidratação, a cutícula também representa uma defesa eficiente contra a entrada da maioria dos patógenos que tentam colonizar a superfície foliar (Figura 3) (Stangarlin *et al.*, 2011).



Figura 3. Organização ultraestrutural e camadas constituintes da cutícula foliar.
Fonte: Elevagro, 2022.

A resistência à proliferação de patógenos se deve à complexidade dos polímeros de cutina presentes na cutícula, que dificultam a manipulação por microrganismos. Somente aqueles que possuem enzimas específicas, conhecidas como cutinases, conseguem degradar essa barreira (Stangarlin *et al.*, 2011). Além disso, a espessura da cutícula desempenha um papel fundamental na resistência das plantas, uma vez que uma cutícula mais espessa está associada a uma maior proteção contra patógenos (Bergamin Filho; Kimati; Amorim, 1995; Reina-Pinto; Yephremov, 2009).

Importante ressaltar que os compostos presentes na cutícula não apenas desempenham um papel na proteção física, mas também estão envolvidos na sinalização celular, ativando outros mecanismos de defesa, como a expressão das proteínas relacionadas à patogênese (Reina-Pinto; Yephremov, 2009). Dessa forma, a cutícula se estabelece como um elemento fundamental na defesa das plantas, integrando funções de impermeabilização e sinalização, que fortalecem a resposta imunológica das plantas a estresses bióticos e abióticos.

2.1.2. Estômatos

Os estômatos são estruturas epidérmicas presentes principalmente nas folhas, mas também em outros órgãos aéreos das plantas, desempenhando papel fundamental nas trocas gasosas (Figura 4).



Figura 4. Estômatos sob microscópio confocal de 16 bits de um estômato aberto de *Zea mays*. Crédito da imagem: Plant Physiology, v. 199, n. 4, 2025, kiaf600, marcados pelas setas. Fonte: adaptado de iStock (2018).

Sua abertura e fechamento são regulados pela turgescência das células que os cercam, permitindo a passagem de dióxido de carbono (CO_2), vapor d'água e, em alguns casos, microrganismos patogênicos, como fungos, bactérias e vírus. Os estômatos também podem servir como vias de penetração para muitos fungos biotróficos², que podem causar sérios problemas fitossanitários (Cid; Teixeira, 2017).

Dessa forma, o tempo de fechamento dos estômatos pode ser entendido como um mecanismo de defesa das plantas (Stangarlin *et al.*, 2011), pois durante períodos de estresse ambiental, como altas temperaturas ou baixa umidade, as plantas podem fechar seus estômatos para minimizar a perda de água e, ao mesmo tempo, restringir a entrada de microrganismos prejudiciais.

Patógenos que dependem exclusivamente da abertura dos estômatos para penetrar, como a ferrugem do colmo do trigo, enfrentam dificuldades para entrar na planta se os estômatos permanecerem fechados ou abrirem-se mais tarde pela manhã (Figura 5). A luz solar intensa pode ressecar o tubo germinativo do patógeno, frustrando assim sua tentativa de proliferação (Bergamin Filho; Kimati; Amorim, 1995).



Figura 5. Organização celular do aparelho estomático: células-guarda, ostíolo e células subsidiárias. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

² São patógenos especializados que necessitam de tecidos vegetais vivos para sobreviver e se reproduzir, funcionando como parasitas obrigatórios.

2.1.3. Tricomas

Os tricomas são extensões das células epidérmicas localizadas na parte aérea das plantas, desempenhando diversas funções que vão além da simples proteção contra agentes externos (Figura 6) (Johnson, 1975; Werker 2000; Kim 2019).

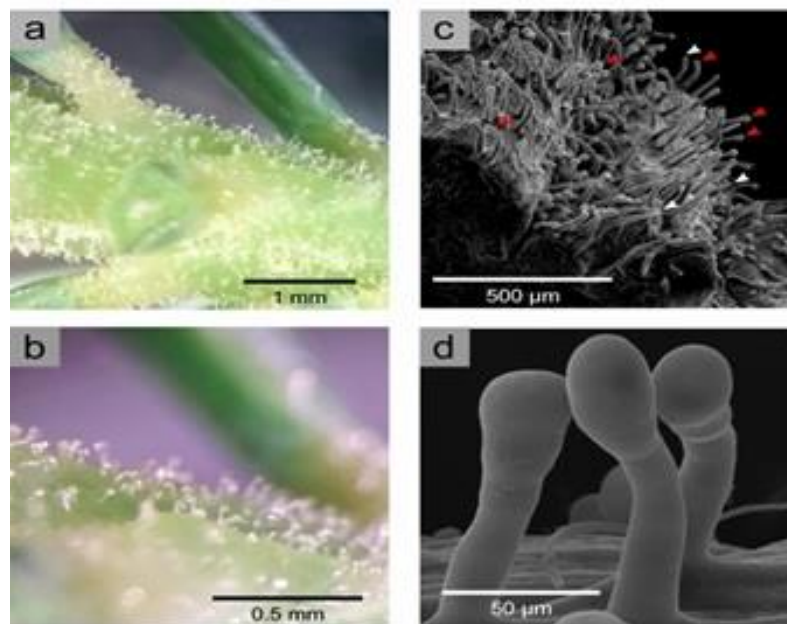


Figura 6. Tricomas glandulares. Imagens a e b (microscópio de dissecação); e c e d (microscopia eletrônica de varredura). Fonte: Cledson *et al.*, 2020.

Há uma grande variedade de tricomas presentes nas plantas, o que torna sua classificação complexa, considerando as diferentes formas, origens, tamanhos, localizações, tipos de agendamento e funções (Werker 2000; Glas *et al.* 2012, Kariyat *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2021). Esses apêndices epidérmicos são fundamentais na proteção física, química e mecânica das plantas, além de atuarem contra pragas e patógenos (Karabourniotis *et al.*, 2020).

Seu papel na defesa das plantas contra fitopatógenos se dá tanto pela densidade, número de tricomas por unidade de área, quanto pela função de substância do metabolismo secundário, que apresentam propriedades antimicrobianas (Shepherd; Wagner 2007; Stangarlin *et al.*, 2011). Além disso, os tricomas podem criar uma superfície hidrofóbica que impede o acúmulo de água, dificultando o estabelecimento de patógenos que dependem de umidade

para germinar e iniciar seu desenvolvimento (Allen *et al.* 1991; Kortekamp *et al.* 1999). Os tricomas também secretam compostos metabólicos que podem atrair polinizadores, fornecer proteção contra a radiação ultravioleta e formar camadas protetoras nos órgãos aéreos, auxiliando na redução da temperatura e na perda de água (Wagner, 1991; Wang *et al.*, 2021).

No entanto, apesar desses benefícios, há estudos que sugerem que a presença dos tricomas pode, em algumas situações, favorecer a infecção por patógenos. Esses apêndices são, em certos casos, locais onde a infecção pode ser iniciada (Calo *et al.*, 2006; Imboden *et al.*, 2018). A penetração de patógenos pode ocorrer em diversos tipos de tricomas, inclusive em estruturas não vivas ou danificadas, que ainda preservam nutrientes em suas bases (Beattie; Lindow, 1995; Pietrarelli *et al.*, 2006).

Apesar de exercerem função primordial na defesa vegetal, os tricomas podem, em determinadas condições, atuar como potenciais pontos de vulnerabilidade à infecção. Lesões na base ou alterações estruturais nessas projeções epidérmicas podem favorecer a adesão, a colonização e a penetração de microrganismos fitopatogênicos. Dessa forma, embora geralmente associados à resistência, os tricomas podem também contribuir, de maneira dependente do contexto, para a suscetibilidade da planta (Kim, 2019; Simplício *et al.*, 2022).

Adicionalmente, estudos recentes têm apontado que os tricomas, especialmente os glandulares, podem atuar como microambientes seletivos para a colonização de microrganismos, influenciados pela composição de seus exsudatos, como compostos fenólicos, terpenoides e metabólitos secundários. Essas evidências sugerem que tais estruturas não apenas exercem funções diretas na defesa contra herbívoros, mas também desempenham papel relevante na modulação da microbiota epifítica e na ativação de respostas de defesa vegetal. Apesar desses avanços, ainda são necessários estudos que aprofundem a compreensão dos mecanismos moleculares e ecológicos que regulam essas interações, bem como sua relação com os processos de resistência e suscetibilidade das plantas em diferentes condições ambientais (Koppenhöfer *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2021).

2.1.4. Parede celular

Uma das características mais marcantes das células vegetais é a presença de uma parede celular fina, mas extremamente resistente. Essa parede é composta por uma mistura complexa de polissacarídeos e outros compostos secretados pela célula, organizada de maneira altamente estruturada por meio de ligações covalentes e não covalentes (Taiz; Zieger, 2002). Essa estrutura desempenha um papel fundamental no suporte mecânico, contribuindo significativamente para o crescimento e desenvolvimento das plantas (Figura 7). Quando uma parede celular é removida por enzimas, a célula resultante é chamada de protoplasto³ (Cid; Teixeira, 2017).

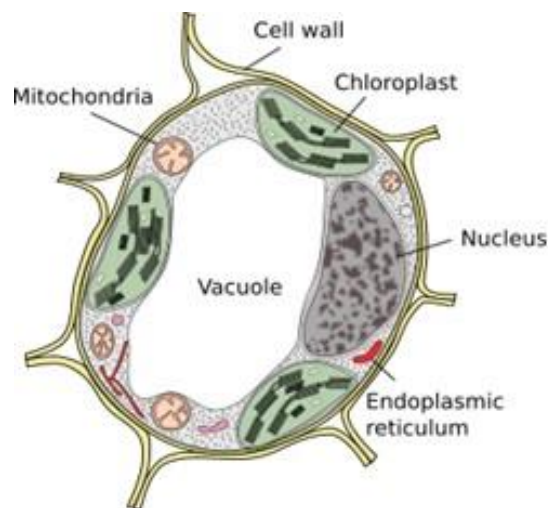


Figura 7. Organização estrutural da célula parenquimática e ultraestrutura da parede celular primária. Fonte: *Atlas of Plant and Animal Histology*, 2025.

As paredes celulares vegetais podem ser específicas em dois tipos: a parede celular primária e a parede celular secundária. A parede primária é formada durante o crescimento celular e deve ser, ao mesmo tempo, mecanicamente estável e suficientemente flexível para permitir a expansão das células, evitando sua ruptura. Ela é composta principalmente de polissacarídeos, como celulose, hemiceluloses e pectinas (Farinas, 2011).

Em contraste, a parede celular secundária é depositada após a cessação do crescimento celular e confere uma estabilidade mecânica adicional à planta.

³ Parte viva de uma célula animal ou vegetal, que compreende o citoplasma, o núcleo e a membrana plasmática.

Essa parede é caracterizada pela presença de celulose e hemicelulose, frequentemente impregnadas de lignina, o que proporciona uma resistência ainda maior. Além dos polissacarídeos, as paredes celulares também contêm uma variedade de proteínas que desempenham funções importantes na estrutura e no funcionamento das células vegetais (Taiz; Zieger, 2002).

2.2. Metabólitos secundários

Os mecanismos de defesa de natureza química constituem uma segunda linha de proteção contra pragas e patógenos. As plantas sintetizam uma ampla variedade de substâncias químicas, classificadas em metabólitos primários e secundários (Figura 8). Os metabólitos primários correspondem a compostos universais, diretamente relacionados aos processos de crescimento e desenvolvimento vegetal, incluindo açúcares, aminoácidos, ácidos graxos, lipídios e nucleotídeos, além de macromoléculas derivadas, como proteínas, polissacarídeos, membranas, DNA e RNA. Em contraste, os metabólitos secundários apresentam elevada especificidade entre espécies e, de modo geral, agrupam-se em três principais classes: terpenos, compostos fenólicos e alcaloides (Taiz *et al.*, 2017).



Figura 8. Barreiras químicas constitutivas: o papel dos metabólitos secundários contra o estresse biótico. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Esses metabólitos são sintetizados continuamente ou armazenados em tecidos específicos, prontos para atuar assim que a planta é ameaçada. Suas funções vão além da proteção, participando também de processos fisiológicos essenciais, como atração de polinizadores, regulação do crescimento e proteção contra estresses abióticos.

2.2.1. Compostos fenólicos

Os compostos fenólicos representam uma classe diversificada de metabólitos secundários vegetais, caracterizados pela presença de um ou mais grupos hidroxila (-OH) ligados a um anel aromático. Derivados do metabolismo do ácido chiquímico e da via dos fenilpropanoides, esses compostos abrangem desde moléculas simples (como ácidos fenólicos e cumarinas) até polímeros complexos (como ligninas e taninos), desempenhando papéis fundamentais na defesa vegetal contra patógenos e estresses abióticos (Figura 9) (Dixon; Paiva, 1995; Naczki; Shahidi, 2004).

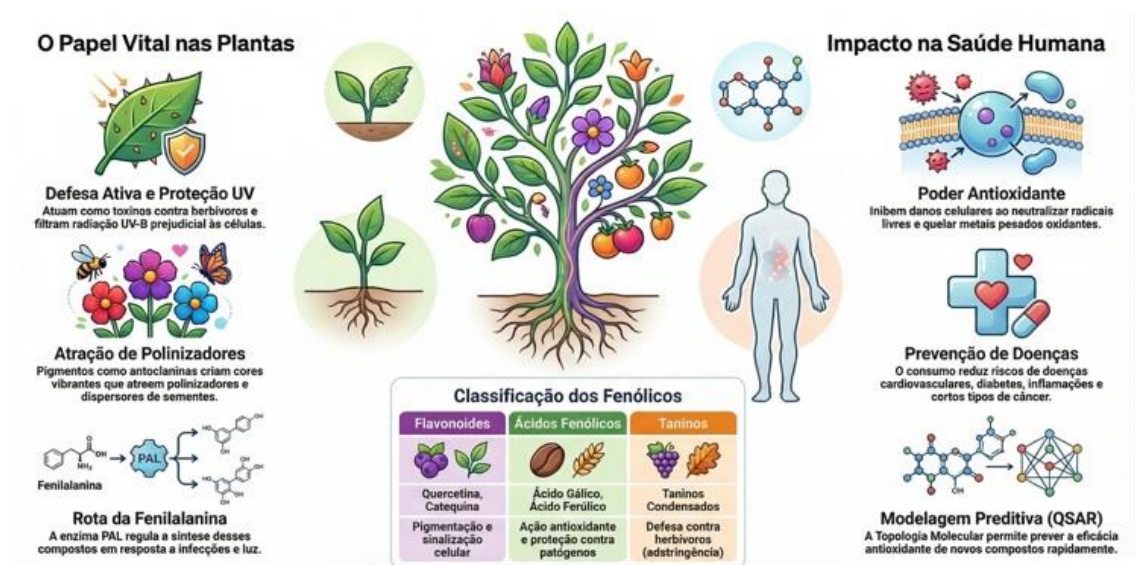


Figura 9. Escudos químicos da natureza: diversidade e estrutura dos compostos fenólicos. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A síntese desses compostos ocorre em células especializadas, sendo subsequentemente armazenados em compartimentos subcelulares como vacúolos ou vesículas, frequentemente na forma glicosilada não tóxica. Essa

compartimentalização é vital para prevenir danos à própria planta, pois os fenóis são tóxicos e deve ser armazenados na sua forma reduzida (Labanca, 2002). Quando a planta enfrenta estresses bióticos (como infecções fúngicas) ou abióticos (como seca), esses compostos são liberados e ativados enzimaticamente por β -glicosidases, transformando-se em formas tóxicas que contribuem para respostas de defesa como a reação hipersensível (RH) ou a repelência a herbívoros (Hrazdina, 1994).

As propriedades antioxidantes dos fenóis, intimamente relacionadas à sua estrutura química, conferem múltiplos mecanismos de proteção, que incluem (Chun *et al.*, 2005; Sousa *et al.*, 2007):

- ✓ Neutralização de radicais livres por intermédio da doação de elétrons;
- ✓ Quelação⁴ de metais de transição como ferro e cobre, impedindo a formação de espécies reativas de oxigênio (ROS); e
- ✓ Estabilização de intermediários oxidativos via ressonância do anel aromático

Tais propriedades são fundamentais para proteger as plantas contra danos oxidativos causados por diversos agentes estressores (Lattanzio *et al.*, 2006).

Estruturalmente, os tricomas glandulares se destacam como fábricas bioquímicas especializadas, secretando uma variedade de fenóis que podem repelir, imobilizar ou intoxicar insetos herbívoros (Levin, 1973). Além dessa defesa direta, fenóis como flavonoides e ligninas reforçam a parede celular e inibem enzimas degradativas de microrganismos (Nicholson; Hammerschmidt, 1992; Beckman, 2000). Notavelmente, alguns fenóis atuam como moléculas sinalizadoras, regulando respostas de defesa sistêmicas que preparam a planta para futuros ataques (Wink, 2018).

Esta multifuncionalidade, atuando simultaneamente como armas químicas, barreiras físicas, antioxidantes e mensageiros moleculares, evidencia o papel

⁴ É um processo químico onde um micronutriente metálico (como Ferro, Zinco, Manganês ou Cobre) é envolvido por uma molécula orgânica, formando um "quelato". Esse revestimento protege o nutriente contra a fixação no solo, tornando-o solúvel e facilmente absorvível pelas raízes ou folhas, melhorando drasticamente a nutrição.

central dos compostos fenólicos nos sofisticados mecanismos de defesa e comunicação das plantas com seu ambiente, tornando-os componentes essenciais para a sobrevivência e adaptação vegetal.

2.2.2. Alcaloides

Os alcaloides representam um dos grupos mais importantes de metabólitos secundários vegetais, caracterizados quimicamente pela presença de pelo menos um átomo de nitrogênio em sua estrutura molecular. Esses compostos nitrogenados são sintetizados a partir de diferentes aminoácidos precursores, como ornitina, lisina, fenilalanina, tirosina e triptofano, por intermédio de vias biossintéticas complexas que frequentemente envolvem múltiplas etapas de modificação enzimática (Ziegler; Facchini, 2008). Sua distribuição no reino vegetal não é uniforme, sendo mais abundantes em certas famílias como Solanaceae, Papaveraceae, Rubiaceae e Apocynaceae, onde desempenham funções ecológicas fundamentais na defesa das plantas contra herbívoros e patógenos (Wink, 2018).

Do ponto de vista estrutural, os alcaloides apresentam uma notável diversidade química, podendo ser classificados em três grandes grupos. Os alcaloides verdadeiros, que constituem a maioria, possuem o nitrogênio incorporado em um anel heterocíclico e incluem exemplos bem conhecidos como a nicotina (*Nicotiana tabacum*), morfina (*Papaver somniferum*) e atropina (*Atropa belladonna*). Os pseudoalcaloides, como a cafeína (*Coffea arabica*) e teobromina (*Theobroma cacao*), diferenciam-se por não derivarem diretamente de aminoácidos, mas sim de outras vias metabólicas. Já os protoalcaloides, representados pela mescalina (*Lophophora williamsii*), apresentam o átomo de nitrogênio em cadeia lateral, não fazendo parte de um sistema cíclico (Figura 10) (Aniszewski, 2015).

As propriedades fisiológicas dos alcaloides estão diretamente relacionadas à sua capacidade de interagir com diversos sistemas moleculares em organismos animais. Muitos atuam como potentes neurotoxinas, interferindo com a neurotransmissão. A nicotina, por exemplo, mimetiza a ação da

acetilcolina ao se ligar aos receptores nicotínicos (Steppuhn *et al.*, 2004), enquanto a atropina bloqueia os receptores muscarínicos (Wink, 2000).

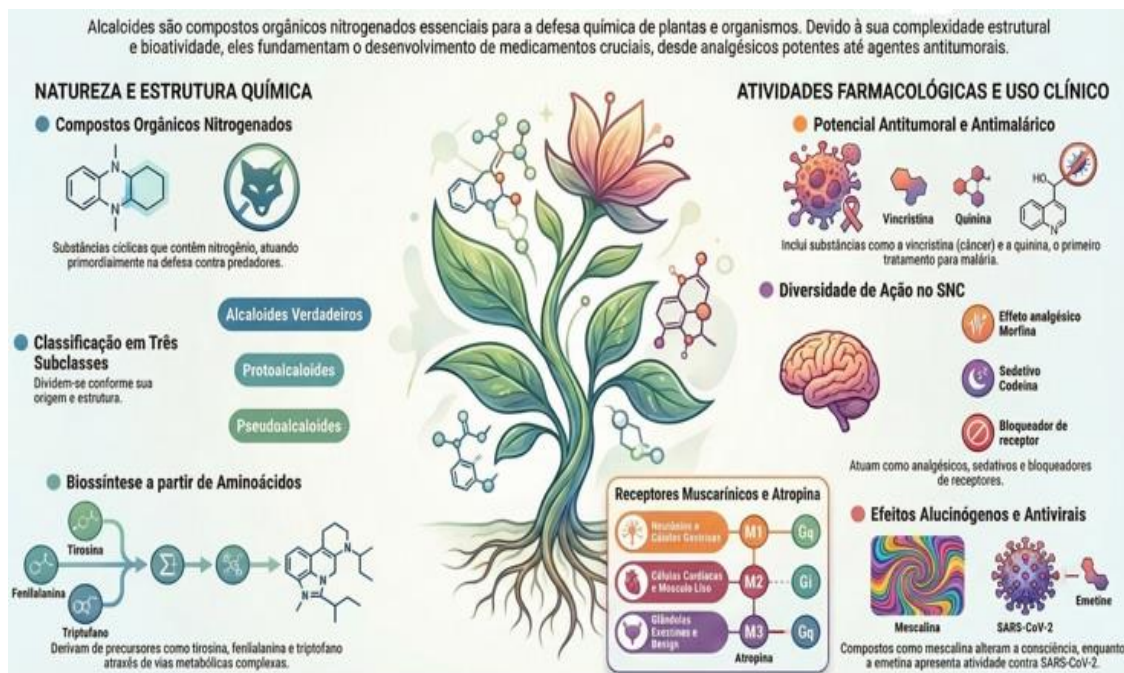


Figura 10. Estrutura química e classificação dos principais alcaloides do metabolismo vegetal. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Outros, como a berberina, exercem ação antimicrobiana ao inibir processos essenciais em patógenos, incluindo a síntese de ácidos nucleicos e proteínas (Iwasa *et al.*, 2001). Essa capacidade de interferir com sistemas biológicos fundamentais explica sua eficácia como agentes de defesa vegetal, desencorajando a herbivoria e prevenindo infecções (Mithöfer; Boland, 2012).

Além de seu papel ecológico, os alcaloides têm grande importância farmacológica. Historicamente, plantas produtoras de alcaloides sempre ocuparam lugar de destaque na medicina tradicional e, atualmente, muitos desses compostos servem como base para medicamentos essenciais. A morfina e seus derivados, como a codeína, permanecem como os analgésicos mais potentes disponíveis (Brownstein, 1993).

A vincristina e vimblastina, isoladas de *Catharanthus roseus*, são componentes fundamentais no tratamento de diversos tipos de câncer (Noble, 1990). A quinina, obtida da casca de *Cinchona spp.*, foi durante séculos o

principal tratamento para malária. Mesmo a cafeína, amplamente consumida em bebidas como café e chá, apresenta efeitos farmacológicos significativos no sistema nervoso central (Nawrot *et al.*, 2003).

A produção de alcaloides nas plantas é altamente regulada e frequentemente induzida em resposta a estresses bióticos e abióticos. Muitas espécies acumulam esses compostos em órgãos ou tecidos específicos, como folhas, raízes ou sementes, frequentemente em estruturas especializadas como vacúolos ou idioblastos. Essa compartimentalização é essencial para evitar efeitos tóxicos na própria planta (Hartmann, 2007).

A compreensão dos mecanismos moleculares envolvidos na biossíntese, armazenamento e regulação dos alcaloides tem avançado significativamente nas últimas décadas, abrindo novas possibilidades para a produção sustentável desses valiosos compostos por meio de abordagens biotecnológicas (O'Connor, 2015).

2.2.3. Terpenoides

Os terpenoides, também conhecidos como isoprenoides, representam a mais extensa e diversa classe de metabólitos secundários em plantas, com mais de 80.000 compostos descritos, número que continua em expansão com o avanço das técnicas de identificação química (Tholl, 2015). Estruturalmente, são caracterizados por unidades repetidas de cinco carbonos (isoprenos) arranjadas em diversas configurações, originando moléculas que variam desde simples monoterpenos (C₁₀) até complexos politerpenos (C_{>40}) (Dudareva *et al.*, 2006).

Essa classe inclui importantes subgrupos como os monoterpenos, sesquiterpenos, diterpenos, triterpenos, carotenoides e as lactonas sesquiterpênicas, todos desempenhando papéis fundamentais na defesa e comunicação das plantas com seu ambiente (Figura 11) (Gershenzon; Dudareva, 2007).

Os terpenoides são sintetizados por intermédio de duas vias metabólicas principais: a via do mevalonato (MVA), que ocorre no citosol; e a via do metileritritol fosfato (MEP), localizada nos plastídios (Vranová *et al.*, 2013). Essa divisão subcelular reflete a especialização evolutiva das plantas para produzir

diferentes classes de terpenoides em distintos compartimentos celulares. Monoterpenos (C₁₀) e diterpenos (C₂₀) são predominantemente sintetizados via MEP, enquanto sesquiterpenos (C₁₅) e triterpenos (C₃₀) derivam principalmente da via MVA (Tholl, 2015).

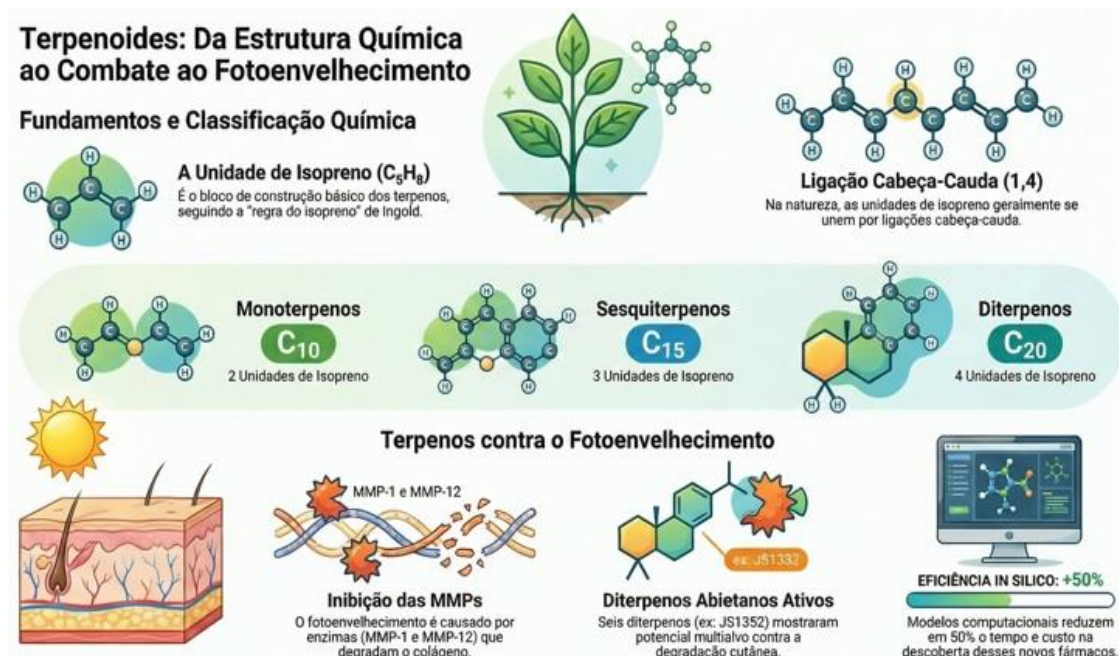


Figura 11. Diversidade estrutural dos terpenoides e mecanismos de mitigação do estresse oxidativo. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

As lactonas sesquiterpênicas, um subgrupo particularmente relevante para a defesa vegetal, são caracterizadas pela presença de um anel lactônico em sua estrutura. Compostos como a partenolida (*Tanacetum parthenium*) e a artemisinina (*Artemisia annua*) destacam-se por suas potentes atividades biológicas (Efferth, 2017). A artemisinina, por exemplo, é um sesquiterpeno lactônico que revolucionou o tratamento da malária e cuja descoberta rendeu o Prêmio Nobel de Fisiologia ou Medicina em 2015 (Tu, 2016).

A atuação dos terpenoides na defesa vegetal ocorre por meio de múltiplos mecanismos. Muitos monoterpenos, como o pineno e o limoneno, e sesquiterpenos, como o β -cariofileno, exercem toxicidade direta sobre insetos herbívoros e microrganismos, danificando suas membranas celulares e perturbando processos fisiológicos (Gershenzon; Dudareva, 2007).

Além disso, alguns terpenoides voláteis, como o (E)- β -ocimeno, atuam na comunicação interorganísmica, atraindo predadores naturais de herbívoros e promovendo uma defesa indireta (Boncan *et al.*, 2006). Outra função importante é a formação de barreiras físicas: triterpenos, como o ácido betulínico, contribuem para o reforço da cutícula vegetal, dificultando a penetração de patógenos (Tholl, 2015). Por fim, derivados oxigenados de diterpenos, como o ácido jasmônico, participam da sinalização intracelular, sendo essenciais para a ativação de respostas defensivas sistêmicas (Howe; Jander, 2008).

A relevância dos terpenoides vai além de suas funções associadas à defesa química das plantas, estendendo-se a diversas aplicações nos setores farmacêutico, cosmético e alimentício, além de seu papel no desenvolvimento de bioinsumos utilizados na agricultura.

Na medicina, destacam-se compostos como a artemisinina e seus derivados, que se tornaram a principal linha de defesa contra a malária resistente, salvando milhões de vidas em regiões endêmicas (Efferth, 2017). No campo da oncologia, o taxol, isolado originalmente da casca do teixo (*Taxus brevifolia*), revolucionou o tratamento de diversos tipos de câncer, particularmente tumores de mama e ovário, graças ao seu mecanismo único de ação que interfere na divisão celular (Suffness, 1995).

Na indústria de cosméticos e alimentos, monoterpenos como o mentol (extraído de *Mentha spp.*) e o limoneno (presente em frutas cítricas) são amplamente empregados como aromatizantes e fragrâncias devido às suas propriedades organolépticas marcantes (Dudareva *et al.*, 2006).

Na agricultura sustentável, os terpenoides voláteis têm se destacado como importantes mediadores no controle biológico de pragas e doenças, atuando tanto na atração de inimigos naturais de herbívoros quanto na repelência direta a insetos-praga. Esses compostos participam de interações tritróficas, nas quais sinais químicos emitidos pelas plantas favorecem o recrutamento de predadores e parasitoides, contribuindo para a regulação das populações de herbívoros (Heil, 2008; Dicke; Baldwin, 2010; Kroes *et al.*, 2017; Borges *et al.*, 2020).

Além disso, estudos aplicados demonstram que óleos essenciais ricos em terpenoides, como os extraídos de *Tephrosia vogelii*, apresentam efeito

inseticida direto contra pragas agrícolas, como *Cerosipha forbesi*, corroborando o potencial desses metabólitos para reduzir a dependência de agrotóxicos nos sistemas de cultivo (Santos *et al.*, 2020).

3. Defesas induzidas

Ao contrário das defesas constitutivas, que estão sempre presentes, as defesas induzidas são ativadas somente após a planta reconhecer uma ameaça, como o ataque de patógenos, herbívoros ou estresses abióticos. Esses mecanismos envolvem uma complexa rede de sinalização molecular, que desencadeia respostas locais e sistêmicas, aumentando a resistência da planta a futuras agressões (Pieterse *et al.*, 2014).

Quando a planta detecta um invasor por meio de receptores específicos, como os PRRs (*Pattern Recognition Receptors*), inicia-se uma cascata de eventos bioquímicos que inclui a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS), a ativação de hormônios de defesa (ácido salicílico, jasmonatos e etileno) e a síntese de proteínas e metabólitos de defesa, como PR-proteínas e fitoalexinas.

Essas respostas podem ser locais, como a Resposta Hipersensível (RH), que causa morte celular programada para isolar o patógeno, ou sistêmicas, como a Resistência Sistêmica Adquirida (RSA) e a Resistência Sistêmica Induzida (RSI), que preparam toda a planta para resistir a novos ataques (Jones; Dangl, 2006).

3.1. Resposta hipersensível

A Resposta Hipersensível (RH) constitui um dos mecanismos de defesa mais rápidos e eficazes das plantas contra patógenos biotróficos, caracterizando-se por uma morte celular localizada no local de infecção. Esse processo suicida cria uma barreira física e química que isola o patógeno, impedindo sua disseminação para tecidos saudáveis (Figura 12) (Heath, 2000).



Figura 12. Mecanismos de defesa induzida: isolamento do foco de infecção por hipersensibilidade celular. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A RH é desencadeada quando proteínas efetoras⁵ do patógeno são reconhecidas por receptores intracelulares (NLRs - *Nucleotide-Binding Leucine-Rich Repeat receptors*), ativando uma complexa cascata de sinalização. Essa cascata envolve, inicialmente, uma explosão oxidativa, com a liberação massiva de espécies reativas de oxigênio (ROS) pela ação de NADPH oxidases (Torres *et al.*, 2006); em paralelo, ocorre a ativação de enzimas líticas, como caspases vegetais (metacaspases) e nucleases, que degradam componentes celulares (Lam, 2004); e, finalmente, a resposta é consolidada pelo acúmulo de fitoalexinas, que são metabólitos antimicrobianos, a exemplo da gliceolina em soja (Ahuja *et al.*, 2012).

Enfim, a resposta hipersensível (RH) é uma forma de resistência induzida nas plantas, caracterizada pela capacidade de reconhecer rapidamente a presença de um patógeno, como fungos, bactérias, vírus ou nematoides, e desencadear a morte celular programada no local da infecção. Esse mecanismo de defesa atua de maneira estratégica, pois, ao provocar a necrose localizada

⁵ São moléculas, frequentemente enzimas ou fatores de transcrição, que executam a resposta final de uma célula a estímulos, alterando sua atividade, metabolismo ou estrutura. Elas atuam no estágio final de vias de sinalização, promovendo processos como migração celular, exocitose, remodelamento da actina e expressão gênica.

dos tecidos, a planta limita o acesso do patógeno a nutrientes e impede sua disseminação para outras partes do organismo.

Visualmente, a resposta hipersensível manifesta-se, em geral, por meio do aparecimento de pequenos pontos necróticos, com coloração marrom ou aspecto seco, na região onde ocorreu a tentativa de penetração do agente patogênico. Devido à sua eficiência em conter infecções logo nas fases iniciais, a RH é considerada um dos componentes mais importantes do sistema imunológico das plantas.

3.2. Resistência sistêmica adquirida (RSA ou SAR)

A Resistência Sistêmica Adquirida (RSA) representa um sofisticado sistema de defesa vegetal que confere proteção de longo prazo contra uma ampla gama de patógenos em tecidos distantes do local da infecção inicial (Figura 13).

Esse fenômeno, descrito inicialmente em plantas de tabaco infectadas com o vírus do mosaico do tabaco (Ross, 1961), envolve uma complexa rede de sinalização molecular que prepara a planta para responder mais eficientemente a futuros ataques (Vlot *et al.*, 2021).

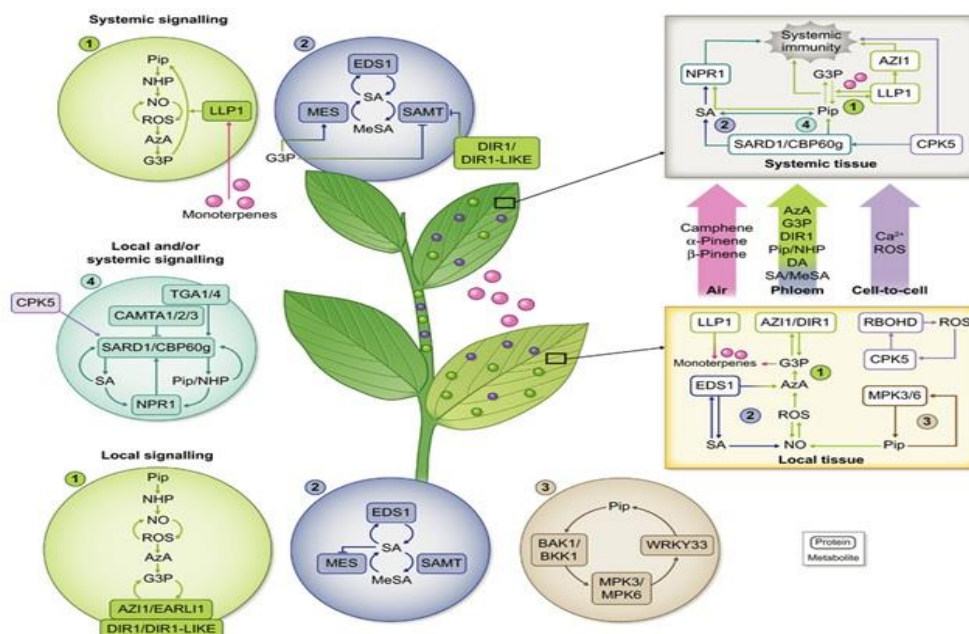


Figura 13. Mecanismos moleculares da RSA: a preparação de tecidos distais para o ataque. Fonte: Vlot *et al.*, 2021.

De acordo com esses mesmos autores, o processo de ativação da RSA inicia-se quando a planta detecta a presença de um patógeno em um tecido específico, desencadeando uma cascata de eventos bioquímicos. A detecção ocorre principalmente por intermédio de receptores de padrões moleculares (PRRs) que reconhecem estruturas conservadas nos microrganismos (PAMPs).

Esse reconhecimento leva à produção local de ácido salicílico (SA), a molécula sinalizadora primária da RSA. Estudos recentes demonstraram que o SA produzido no local da infecção é transportado para outras partes da planta por meio do floema, sendo que o metil salicilato (MeSA), uma forma volátil do SA, também participa ativamente dessa sinalização sistêmica, amplificando o alerta de defesa para tecidos distantes (Vlot *et al.*, 2021). Paralelamente, ocorre a ativação de enzimas como a fenilalanina amônia-liase (PAL), fundamental na biossíntese do SA, e a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS), que atuam como segundos mensageiros na cascata de sinalização.

No cerne da via de sinalização da RSA, segundo esses mesmos autores, encontra-se a proteína NPR1 (Nonexpresser of PR genes 1), considerada o regulador mestre deste processo. Em condições basais, a NPR1 existe no citoplasma como oligômeros mantidos por pontes dissulfeto. Quando os níveis de SA aumentam, ocorre uma mudança no estado redox celular, levando à redução dessas pontes e à dissociação dos oligômeros em monômeros de NPR1. Estes monômeros são então translocados para o núcleo, onde interagem com fatores de transcrição da família TGA.

A interação NPR1-TGA promove a ligação a elementos regulatórios específicos no DNA, ativando a expressão de genes de defesa conhecidos como PR (Pathogenesis-Related). Entre esses genes destacam-se a PR-1, considerada o principal marcador molecular da RSA, além de PR-2 (β -1,3-glucanases), PR-3 (quitinases) e PR-5 (proteínas similares à taumatina), que atuam sinergicamente para conferir resistência contra diversos patógenos (Vlot *et al.*, 2021).

Um dos aspectos mais notáveis da Resistência Sistêmica Adquirida (RSA) é sua capacidade de estabelecer uma memória imunológica na planta. Esse fenômeno ocorre por meio de modificações epigenéticas, incluindo metilação de histonas e remodelação da cromatina, que mantêm os genes de defesa em um

estado de pré-ativação, permitindo respostas mais rápidas e eficientes a infecções subsequentes (Figura 14) (Jaskiewicz; Conrath; Peterhänsel, 2011; Luna *et al.*, 2012).

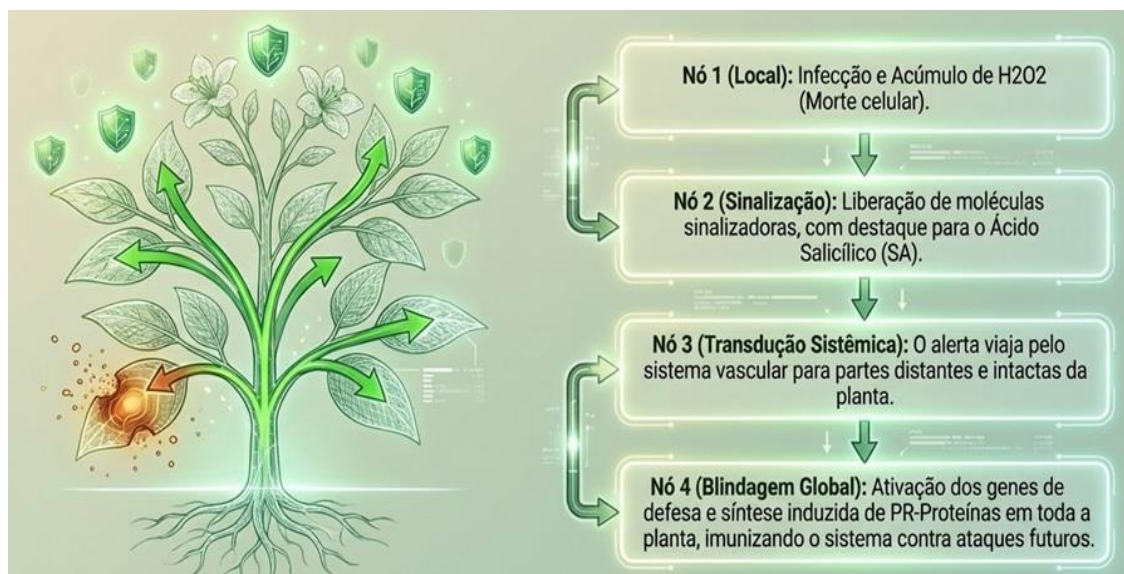


Figura 14. Memória imunológica vegetal: o mecanismo de proteção sistêmica contra patógenos. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Essa memória imunológica pode persistir por semanas ou até meses após o estímulo inicial e, em alguns casos, efeitos transgeracionais têm sido observados (Espinas; Alexander; Conrath, 2016). Além disso, a natureza sistêmica da RSA assegura que a proteção não se restrinja ao sítio de infecção primária, mas se propague por toda a planta, preparando diferentes órgãos e tecidos para futuros ataques. Essa resposta sistêmica mostra-se particularmente eficaz contra patógenos biotróficos e hemibiotróficos⁶, incluindo vírus, bactérias e fungos que dependem de tecidos vivos para sua sobrevivência e multiplicação.

A via da RSA não opera isoladamente, mas está integrada a outros sistemas de defesa da planta. Existe um complexo *crosstalk*⁷ entre a via do SA

⁶ São patógenos de plantas (fungos, bactérias ou oomicetos) que possuem um modo de vida duplo. Eles iniciam a infecção agindo como biotróficos (mantendo as células do hospedeiro vivas e absorvendo nutrientes) e, posteriormente, mudam para um estilo necrotrófico, matando os tecidos da planta para se alimentar.

⁷ Em fisiologia vegetal, o *crosstalk* (intercomunicação ou conversa cruzada, em tradução livre) refere-se à interação complexa e interconexão entre diferentes vias de sinalização dentro da planta.

(responsável pela RSA) e a via do jasmonato (associada à Resistência Sistêmica Induzida - RSI), que pode resultar em efeitos antagônicos ou sinérgicos dependendo do tipo de patógeno. A proteína NPR1 desempenha um papel central nessa integração, atuando como um hub regulatório que coordena as diferentes respostas de defesa. Além disso, a RSA está sujeita a uma fina regulação negativa para evitar gasto energético excessivo, envolvendo proteínas como NPR3 e NPR4, que medeiam a degradação de NPR1 em condições de alta concentração de SA, garantindo assim que a resposta de defesa seja proporcional à ameaça.

3.3. Resistência sistêmica induzida (RSI)

A Resistência Sistêmica Induzida (RSI) representa um mecanismo de defesa ativado em resposta a danos causados por herbívoros ou infecções por patógenos necrotróficos, mediado principalmente pelos hormônios vegetais ácido jasmônico (JA) e etileno (ET). Diferentemente da RSA (dependente do ácido salicílico), a RSI oferece proteção ampla contra pragas mastigadoras e microrganismos que se alimentam de tecido morto (Pieterse *et al.*, 2014). O mecanismo de funcionamento da RSI pode ser dividido em etapas distintas, conforme ilustrado na Figura 15, que mostra os principais componentes moleculares envolvidos neste processo.

A Resistência Sistêmica Induzida (RSI) é ativada quando a planta detecta padrões moleculares associados a herbívoros (HAMPs) ou patógenos necrotróficos por meio de receptores específicos. Esse reconhecimento desencadeia uma cascata de sinalização que envolve a produção de ácido jasmônico (JA), sintetizado a partir do ácido linolênico via enzimas LOX, AOS e OPR. Paralelamente, ocorre a ativação do etileno (ET), resultante da conversão de ACC pela enzima ACC oxidase. Além disso, forma-se o JA-Ile, a forma biologicamente ativa do ácido jasmônico, que surge da conjugação do JA com isoleucina, desempenhando um papel central na regulação das respostas defensivas da planta.

Como mostrado na Figura 15, estes sinais hormonais atuam sinergicamente para preparar a planta para uma resposta de defesa sistêmica.

A sinalização à distância ocorre tanto via floema (moléculas hidrossolúveis) quanto por intermédio da atmosfera (compostos orgânicos voláteis), preparando tecidos não infectados para possíveis ataques futuros.

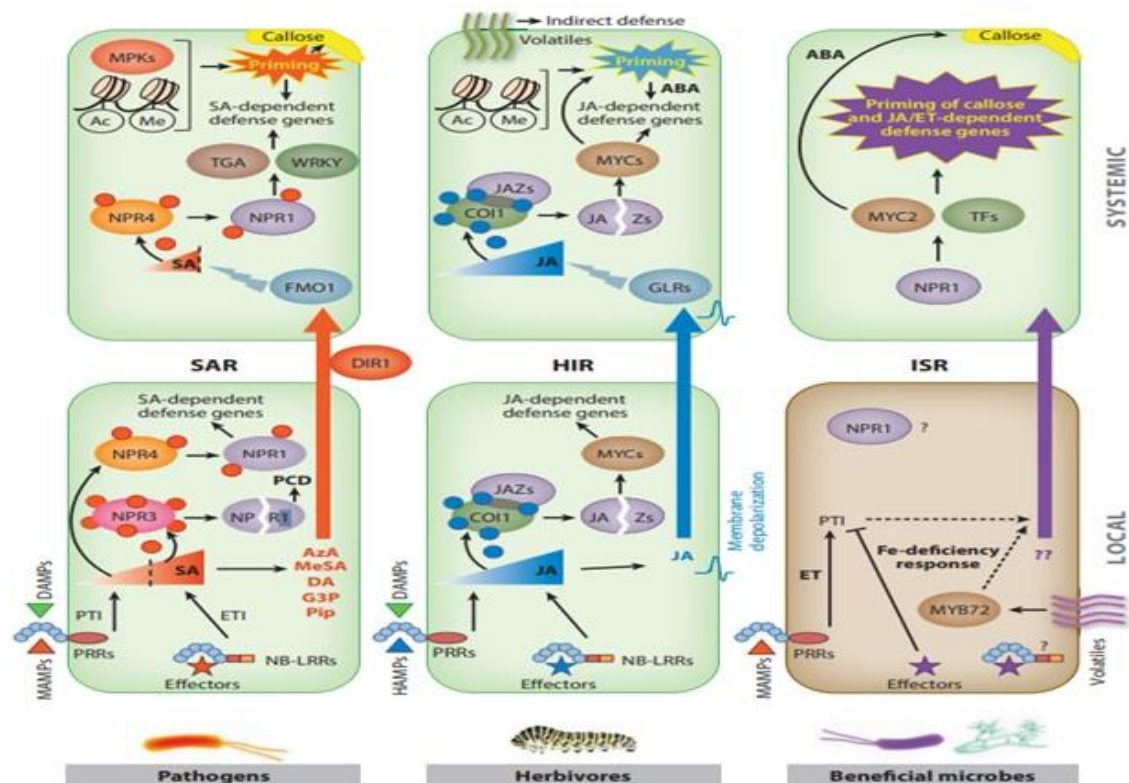


Figura 15. Representação esquemática das vias de sinalização e componentes da RSI em plantas. Fonte: Pieterse *et al.*, 2014.

3.4. PR-Proteínas

As PR-proteínas (Proteínas Relacionadas à Patogênese) constituem um diversificado grupo de proteínas de defesa que são sintetizadas por plantas em resposta ao ataque de patógenos ou a estresses abióticos. Descobertas inicialmente em plantas de tabaco infectadas com o vírus do mosaico do tabaco (TMV), estas proteínas foram subsequentemente classificadas em 17 famílias (PR-1 a PR-17) com base em suas propriedades bioquímicas, atividades enzimáticas e sequências de aminoácidos (Van Loon *et al.*, 2006). Sua expressão é regulada principalmente pelas vias de sinalização do ácido salicílico (SA) e do ácido jasmônico (JA), atuando como componentes efetores tanto da Resistência Sistêmica Adquirida (RSA) quanto da Resistência Sistêmica Induzida (RSI).

As PR-proteínas desempenham funções essenciais na defesa vegetal, apresentando três características funcionais fundamentais. Em primeiro lugar, muitas exibem atividade antimicrobiana direta, atuando enzimaticamente contra componentes estruturais de patógenos. Além disso, algumas PR-proteínas cumprem importante função sinalizadora, servindo como moléculas de comunicação tanto intra quanto intercelular. Por fim, destacam-se por sua versatilidade de ação, demonstrando eficácia contra diversos tipos de agentes patogênicos, incluindo vírus, bactérias, fungos e nematoides. Essa multifuncionalidade faz das PR-proteínas elementos fundamentais no sistema imunológico das plantas (Sels *et al.*, 2008).

Estas proteínas são tipicamente pequenas (10-40 kDa), resistentes a proteases e estáveis em condições extremas de pH e temperatura, características que as tornam efetivas em diversos microambientes vegetais. Sua produção ocorre tanto localmente no sítio de infecção quanto sistemicamente em tecidos distantes, sendo frequentemente utilizadas como marcadores moleculares da ativação de defesas (Sels *et al.*, 2008).

As PR-proteínas exibem uma notável diversidade estrutural, refletindo sua adaptação evolutiva a diferentes pressões seletivas. Muitas dessas proteínas surgiram através de eventos de duplicação gênica e divergência funcional, permitindo às plantas desenvolver um repertório especializado contra patógenos específicos. Estudos filogenéticos revelam que famílias como as PR-1 (com domínio CAP) e PR-5 (taumatina-like) são conservadas em angiospermas, sugerindo funções essenciais mantidas ao longo de 100 milhões de anos de evolução (Liu *et al.*, 2015). Curiosamente, algumas PR-proteínas apresentam homologia com proteínas envolvidas em processos de desenvolvimento, indicando que mecanismos de defesa podem ter se originado a partir da cooptação de vias metabólicas primárias (Figura 16).

Além da regulação transcricional por SA e JA, as PR-proteínas são moduladas por mecanismos pós-traducionais sofisticados. Processos como fosforilação por quinases MAP, glicosilação e proteólise controlada ajustam sua atividade em tempo real. A compartimentalização subcelular também é fundamental: muitas PR-proteínas são armazenadas em vacúolos ou vesículas

e liberadas apenas durante o ataque patogênico, prevenindo danos às células vegetais (Gomes *et al.*, 2019).



Figura 16. Classificação e mecanismos enzimáticos das PR-Proteínas na defesa induzida. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Recentemente, descobriu-se que pequenos RNAs interferentes regulam negativamente certas PR-proteínas após o controle da infecção, demonstrando um fino equilíbrio entre ativação e desativação das respostas de defesa para otimizar o uso de recursos metabólicos.

3.5. Respostas morfológicas (Galhas)

As galhas, também conhecidas como cecídios, representam um fascinante exemplo de modificação morfológica induzida em plantas por diversos organismos, incluindo insetos, ácaros, nematoides e microrganismos (Stone; Schönrogge, 2003). Essas estruturas anômalas surgem como resultado de uma complexa interação entre a planta e o organismo indutor, envolvendo sofisticados mecanismos de manipulação do desenvolvimento vegetal (Shorthouse *et al.*, 2005).

A formação de galhas inicia-se quando a planta reconhece moléculas sinalizadoras específicas produzidas pelo organismo indutor, como proteínas efetoras de insetos ou compostos secretados por bactérias (Hogenhout; Bos, 2011). Esse reconhecimento desencadeia profundas alterações nos padrões de crescimento celular, levando tanto à hiperplasia (aumento no número de células) quanto à hipertrofia (aumento no tamanho celular) (Formiga *et al.*, 2015). O processo resulta na diferenciação de tecidos especializados, incluindo zonas nutritivas ricas em carboidratos e proteínas que beneficiam o organismo indutor, e camadas protetoras que isolam a galha do resto da planta (Figura 17) (Raman *et al.*, 2005).

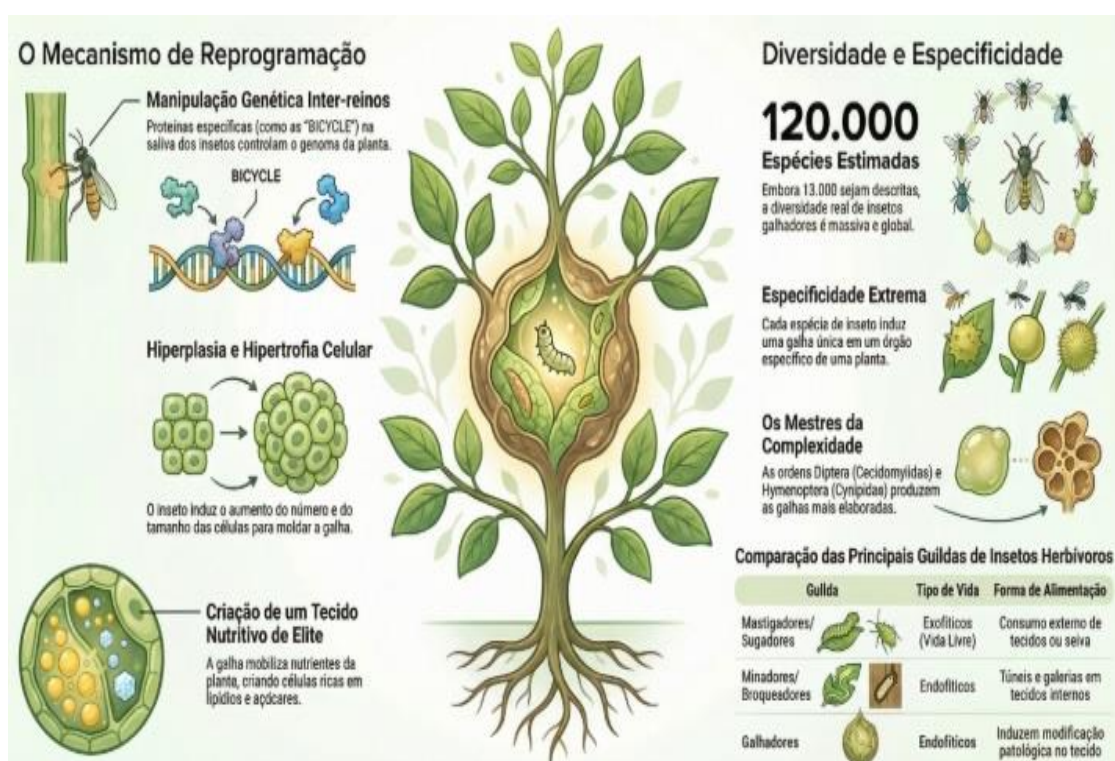


Figura 17. Plasticidade fenotípica induzida: morfologia e desenvolvimento de galhas entomógenas. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Diferentes tipos de galhas podem ser observados na natureza, cada um com características morfológicas e funcionais distintas (Carneiro *et al.*, 2009). As galhas organóides, induzidas por vespas da família *Cynipidae*, formam estruturas complexas que servem de abrigo para o desenvolvimento das larvas (Stone *et al.*, 2002). Já as galhas histióides, causadas por bactérias como

Agrobacterium tumefaciens, caracterizam-se por um crescimento desorganizado de tecidos parenquimáticos (Escobar; Dandekar, 2003). As galhas neoplásicas, associadas a fungos como *Ustilago maydis*, frequentemente afetam órgãos reprodutivos da planta (Martínez-Espinoza *et al.*, 2002).

Ecologicamente, as galhas representam um custo energético significativo para a planta, podendo consumir até 30% dos recursos fotossintéticos (Larson; Whitham, 1997). Entretanto, em alguns casos, podem conferir benefícios indiretos, como a atração de parasitoides que controlam populações de herbívoros (Tooker *et al.*, 2008). Para os organismos indutores, as galhas oferecem um microambiente protegido e rico em nutrientes, essencial para seu desenvolvimento (Price *et al.*, 1987).

Outro enfoque ecológico importante está na distribuição e diversidade de galhadores em biomas naturais que influenciam sistemas agrícolas adjacentes. Cintra *et al.* (2020) organizaram um vasto conjunto de dados relacionando insetos galhadores e plantas hospedeiras no bioma do Cerrado, destacando como a riqueza específica e familiar em diferentes espécies vegetais pode influenciar as interações ecológicas e a potencial resiliência funcional de comunidades de herbívoros em paisagens de cultivo e áreas naturais. Esses dados oferecem uma base para compreender padrões de biodiversidade que podem ser considerados no manejo agroecológico de pragas.

Pesquisas demonstram que a relação entre insetos formadores de galhas e suas plantas hospedeiras é dinâmica e complexa, envolvendo não apenas a fisiologia vegetal modificada, mas também efeitos nas defesas indiretas das plantas. Estudos como o de Tooker *et al.* (2008) mostraram que certos insetos galhadores, além de induzir galhas, podem influenciar as respostas indiretas da planta ao herbivoria, por exemplo ao manipular a emissão de compostos voláteis que seriam atrativos para inimigos naturais, o que pode alterar a eficácia de defesas ecológicas em comunidades tritróficas de um agroecossistema (Figura 18).



Figura 18. Defesa por recrutamento: o papel dos voláteis vegetais na atração de predadores e parasitoides. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

4. Manejo ecológico de pragas

O manejo agroecológico atua diretamente na promoção de interações benéficas entre os componentes do agroecossistema, solo, plantas, microrganismos e insetos, favorecendo assim, a expressão dos mecanismos naturais de defesa vegetal. Ao priorizar práticas como adubação orgânica, rotação de culturas, cultivos múltiplos, adubação verde e conservação da matéria orgânica, cria-se um ambiente biológico mais diverso e funcional. Altieri e Nicholls (2000) destacam que esse tipo de manejo estimula o equilíbrio ecológico por meio da “engenharia ecológica” dos sistemas produtivos, na qual a biodiversidade promove serviços essenciais como o controle biológico de pragas, a ciclagem de nutrientes e a supressão natural de doenças (Figura 19).

A compreensão do manejo ecológico de pragas e doenças está diretamente relacionada ao equilíbrio do sistema solo-planta, conforme destacado por Ana Maria Primavesi. A ocorrência de pragas não deve ser compreendida como um fenômeno isolado, mas como consequência de desequilíbrios ecológicos, especialmente aqueles associados à degradação do solo e à nutrição inadequada das plantas, práticas estas que são constantemente

presentes em cultivos convencionais. Assim, plantas cultivadas em solos biologicamente ativos, ricos em matéria orgânica, apresentam maior resistência natural a organismos patogênicos.



Figura 19. A visão holística da resistência: da estrutura molecular ao planejamento da paisagem. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Outro aspecto relevante refere-se ao uso intensivo de agrotóxicos, uma vez que essa prática não elimina apenas os organismos considerados nocivos, mas também seus inimigos naturais, comprometendo dessa forma o equilíbrio ecológico e favorecendo o surgimento de novas pragas (Figura 20).

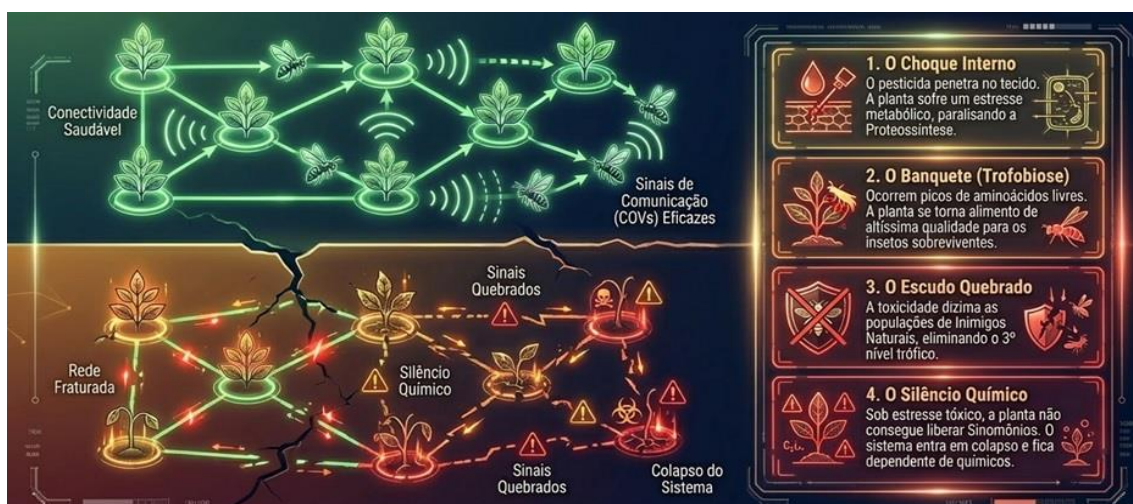


Figura 20. A intervenção química afeta a praga e desestabiliza a imunidade do sistema. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Dessa forma, um manejo preventivo, baseado na diversificação de culturas, na manutenção da cobertura do solo e no estímulo à atividade biológica, conseguirá promover um sistema agrícola mais equilibrado e sustentável (Primavesi, 2016).

4.1. Solo vivo e microbioma

Na agroecologia, o solo é considerado um agroecossistema vivo, no qual a diversidade microbiana exerce papel fundamental no fortalecimento da defesa das plantas. Autores como Altieri e Nicholls (2000) destacam que a agroecologia visa “nutrir o sistema” em vez de corrigir problemas isolados, estabelecendo o solo como o alicerce para a saúde das culturas.

Nesse contexto, destaca-se a rizosfera: é a região próxima às raízes das plantas onde ocorre uma intensa interação entre as raízes e os microrganismos do solo (Hiltner, 1904). Solos vivos e ricos em matéria orgânica, por exemplo, favorecem a atividade de microrganismos benéficos que interagem com as raízes, estimulando a produção de compostos e melhorando a imunidade da planta (Aquino; Assis, 2012).

Estudos recentes, como o de Jarupula *et al.* (2022), mostram que solos com manejos agroecológicos apresentam microrganismos que competem com patógenos e produzem substâncias antifúngicas, reduzindo a pressão de pragas e doenças. Esse fenômeno, conhecido como “solos supressivos”, foi detalhado por Spooren *et al.* (2024) que destacam a importância de compostagem contínua e rotação de culturas para manter microrganismos antagonistas como *Pseudomonas* e *Bacillus* ativos.

Nesse sentido, destaca-se a relação simbiótica entre plantas e fungos micorrízicos arbusculares (AMF). A relação entre eles e as raízes das plantas desempenha um papel fundamental tanto na nutrição mineral quanto na ativação de mecanismos naturais de defesa. Além de aumentar significativamente a absorção de nutrientes como fósforo, esses fungos também influenciam o sistema imunológico da planta, deixando-a mais preparada para responder a estresses, como infecções fúngicas ou ataques de herbívoros (Figura 21).

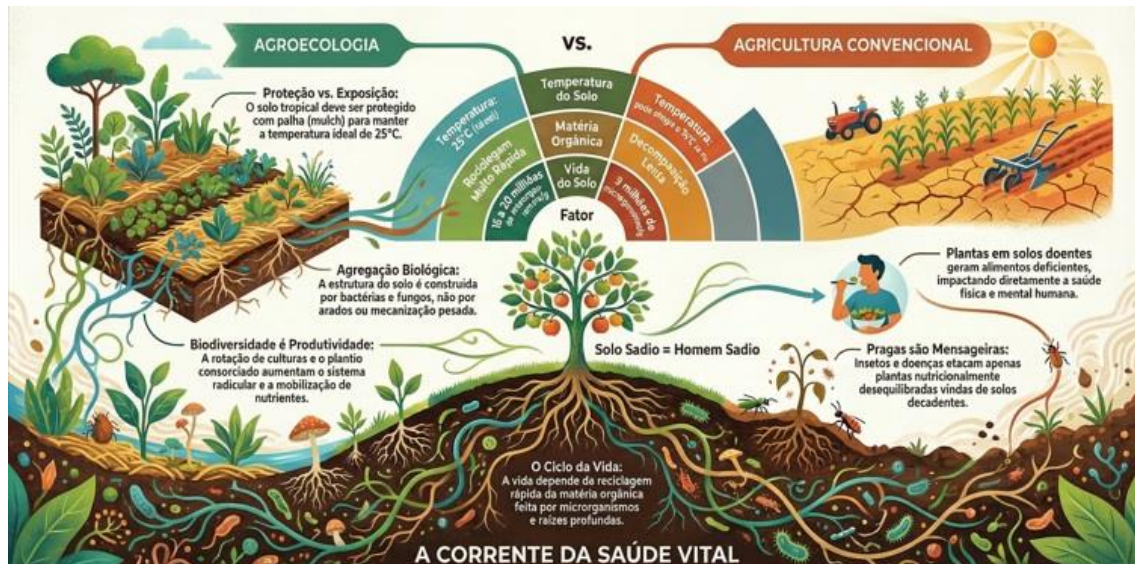


Figura 21. Bioestrutura e resiliência: a vida no solo como reguladora da sanidade vegetal superior. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

De acordo com Muñoz-Labrado *et al.* (2022), a presença de AMF pode induzir um estado de “resistência latente”, no qual as plantas ativam defesas antioxidantes e hormonais de forma mais rápida e eficaz diante de seres patógenos. Esse fenômeno, conhecido como resistência induzida por micorrizas, tem sido cada vez mais valorizado como uma estratégia ecológica promissora para o controle de doenças em sistemas sustentáveis e agroecológicos, especialmente aqueles que evitam o uso de insumos químicos e favorecem práticas como o uso de matéria orgânica e o não revolvimento do solo.

4.2. Diversidade vegetal e sinais químicos

A introdução de diversidade vegetal, por meio de consórcios e rotação de culturas, não só reduz o impacto de pragas específicas e interrompe ciclos patogênicos, mas também induz uma série de interações ecológicas benéficas. As plantas vizinhas podem trocar sinais químicos usando compostos voláteis como metil-jasmonato, (E)- β -cariofileno e aldeídos C6, que “alertam” plantas próximas para antecipar suas defesas. Isso não apenas estimula defesas internas, como também atrai inimigos naturais das pragas, como vespas parasitoides e ácaros predadores, aumentando a proteção de forma ativa e coletiva (Figura 22) (Heil; Karban, 2010).

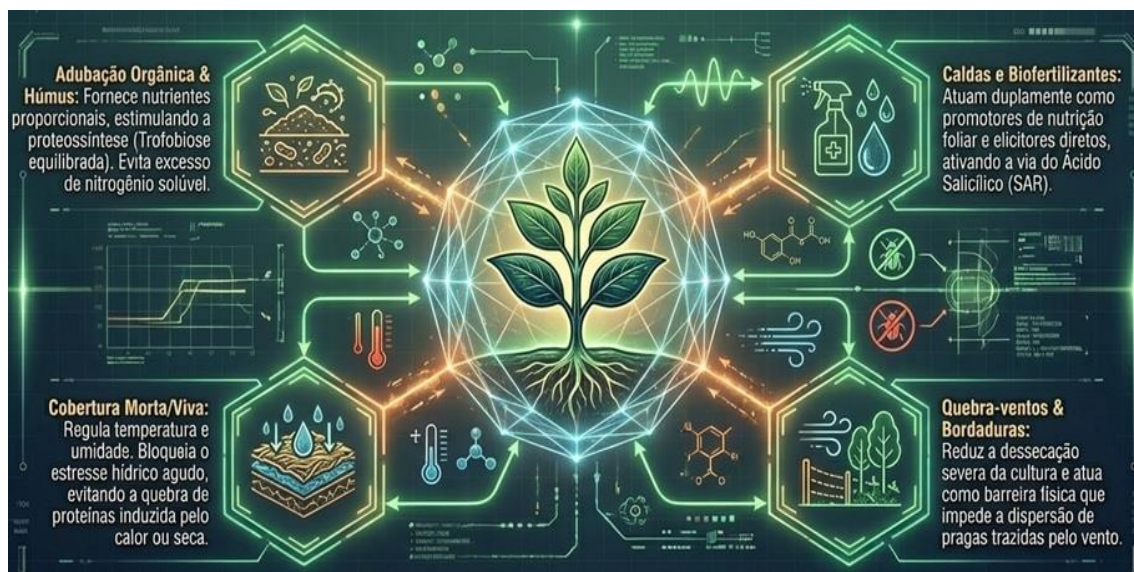


Figura 22. A construção da resiliência: do manejo da biodiversidade ao fortalecimento da imunidade sistêmica. Fonte: elaboração própria (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Além disso, redes de fungos micorrízicos, conhecidas como *Common Mycorrhizal Networks* (CMNs), interligam raízes de diferentes plantas e atuam como canais subterrâneos para a transmissão de sinais de defesa. Em um experimento marcante, Babikova *et al.* (2013) demonstraram que, ao atacar plantas de fava (*Vicia faba*) com afídeos (*Aphis fabae*), plantas vizinhas conectadas pela rede micorrízica começaram a produzir precocemente compostos como o methyl salicylate, mesmo sem contato direto.

De acordo com esses mesmos autores, esse composto atua como um sinal de alarme que pode repelir pragas e, ou, atrair seus inimigos naturais, como vespas parasitoides. Esses resultados evidenciam que tais redes fúngicas funcionam como um sistema subterrâneo de comunicação de defesa, integrando diferentes plantas dentro do agroecossistema e fortalecendo a proteção coletiva de maneira natural e eficiente.

5. Trofobiose

A teoria da trofobiose constitui um dos pilares conceituais mais relevantes para a compreensão das relações entre plantas, pragas e patógenos em sistemas agrícolas, especialmente sob a perspectiva agroecológica. Proposta

pelo pesquisador francês Francis Chaboussou, essa teoria sustenta que o estado nutricional das plantas exerce influência direta sobre sua suscetibilidade ao ataque de insetos-praga e microrganismos patogênicos. Segundo essa abordagem, plantas em desequilíbrio metabólico, sobretudo com acúmulo de substâncias solúveis como aminoácidos livres e açúcares redutores, tornam-se mais atrativas e vulneráveis aos organismos fitófagos (Chaboussou, 2006).

De acordo com esse mesmo autor, o uso excessivo de adubos solúveis e agroquímicos pode comprometer a síntese proteica nas plantas, levando ao acúmulo de compostos de baixo peso molecular, que são mais facilmente assimiláveis por insetos e patógenos. Esse desequilíbrio favorece o desenvolvimento desses organismos, criando um ambiente propício para surtos populacionais. Assim, ao contrário da visão convencional que trata pragas como agentes externos a serem combatidos, a trofobiose propõe que a origem do problema está, em grande medida, na condição fisiológica da planta e no manejo do sistema produtivo.

Essa interpretação dialoga diretamente com os princípios da agroecologia, conforme discutido por Altieri (2012) e Souza *et al.* (2025), ao destacarem que sistemas agrícolas simplificados e dependentes de insumos externos tendem a gerar desequilíbrios nutricionais e ecológicos. Em contraste, sistemas diversificados, com manejo orgânico do solo e maior biodiversidade funcional, favorecem o equilíbrio metabólico das plantas, reduzindo sua suscetibilidade a ataques. Dessa forma, a trofobiose reforça a importância de práticas que promovam a saúde do agroecossistema como um todo.

Além disso, a teoria encontra respaldo em estudos sobre fisiologia vegetal e interações planta-inseto, que evidenciam que plantas bem nutridas e em equilíbrio metabólico apresentam maior capacidade de síntese de proteínas complexas e metabólitos secundários, muitos dos quais atuam na defesa contra herbívoros e patógenos (Taiz *et al.*, 2017). Esse equilíbrio reduz a disponibilidade de nutrientes simples na seiva, dificultando o desenvolvimento de organismos fitófagos. Assim, a resistência das plantas não depende apenas de fatores genéticos, mas também das condições ambientais e do manejo adotado.

No contexto do manejo ecológico, práticas como adubação verde, uso de compostos orgânicos, rotação e consórcio de culturas, além da redução do uso

de insumos químicos, são fundamentais para evitar os desequilíbrios apontados pela trofobiose. Conforme ressaltado por Primavesi (2016), o solo vivo e equilibrado é a base para plantas saudáveis e resistentes. A autora enfatiza que a fertilidade do solo deve ser compreendida de forma biológica, e não apenas química, valorizando a atividade microbiana e os processos naturais de ciclagem de nutrientes (Figura 23).



Figura 23. Teoria da Trofobiose: a relação entre o excesso de substâncias solúveis e a suscetibilidade a patógenos. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Portanto, a trofobiose amplia a compreensão sobre a dinâmica das pragas e doenças, deslocando o foco do combate direto para a prevenção por meio do equilíbrio do sistema. Essa abordagem contribui significativamente para a construção de modelos agrícolas mais sustentáveis, ao integrar conhecimentos da fisiologia vegetal, ecologia e manejo agroecológico. Ao reconhecer que a saúde das plantas está intrinsecamente ligada à saúde do solo e do agroecossistema, reforça-se a necessidade de práticas que promovam a autonomia dos sistemas produtivos e a redução da dependência de insumos externos (Souza *et al.*, 2025).

Nesse contexto, práticas como a adubação verde, o uso de compostos orgânicos, a diversificação de culturas e a cobertura do solo assumem papel estratégico na manutenção do equilíbrio metabólico das plantas. Além disso, o

fortalecimento das interações biológicas, especialmente na rizosfera, favorece a ciclagem de nutrientes e a supressão natural de organismos indesejáveis. Essa perspectiva também implica uma mudança no olhar do agricultor, que passa a interpretar a presença de pragas como indicadora de desequilíbrios no sistema. Assim, a trofobiose não apenas orienta práticas mais sustentáveis, mas também contribui para a construção de agroecossistemas mais resilientes e adaptados às variações ambientais.

6. Considerações

Ao longo deste capítulo, foram discutidos os diversos mecanismos que as plantas desenvolveram para se proteger contra ameaças bióticas e abióticas, desde barreiras físicas e químicas constitutivas até complexos sistemas de defesa induzidos após o reconhecimento de estresses. Esses mecanismos evidenciam a capacidade adaptativa das plantas e sua interação dinâmica com o ambiente.

Nesse sentido, os sistemas de defesa vegetal assumem papel central na construção de uma agricultura sustentável. Em contraste com modelos dependentes de insumos externos, as práticas agroecológicas buscam potencializar essas defesas naturais por meio do manejo equilibrado do solo, da biodiversidade e das interações ecológicas. A rizosfera, com sua rica comunidade de microrganismos benéficos, e os sistemas de comunicação entre plantas, mediados por sinais químicos e associações micorrízicas, demonstram que os agroecossistemas podem ser manejados com base em processos naturais já existentes.

O avanço da agricultura sustentável está, portanto, diretamente relacionado à compreensão e à valorização desses processos. Estratégias como o uso de sementes crioulas, a seleção de cultivares com maior capacidade de expressão de eficiência natural, a aplicação de indutores de resistência e o manejo dos microbiomas do solo configuram caminhos promissores, ao integrarem conhecimentos tradicionais e científicos.

Além disso, a teoria da trofobiose oferece uma base explicativa relevante ao evidenciar que o desequilíbrio metabólico das plantas, frequentemente

associado ao manejo inadequado e ao uso excessivo de insumos químicos, favorece a incidência de pragas e doenças. Ao promover o equilíbrio nutricional por meio da ciclagem de nutrientes, da adubação orgânica e da diversificação dos sistemas produtivos, a agroecologia reduz a disponibilidade de compostos solúveis que atraem organismos fitófagos, fortalecendo a resistência natural das plantas.

Em síntese, a saúde vegetal deve ser compreendida menos como resultado do controle direto de agentes nocivos e mais como expressão de sistemas equilibrados e funcionalmente integrados. Essa abordagem sistêmica, que considera as interações entre solo, plantas e microrganismos, não apenas reduz a dependência de agrotóxicos, mas também redefine os fundamentos da produção agrícola, apontando para um modelo mais resiliente, sustentável e alinhado aos princípios ecológicos.

7. Referências

- AHUJA, I. *et al.* Phytoalexins in defense against pathogens. **Trends in Plant Science**, v. 17, n. 2, p. 73-90, 2012.
- ALLEN, E. A.; HOCH, H. C.; STEADMAN, J. R.; STAVELY, R. J. Influência das características da superfície foliar na deposição de esporos e no crescimento epifítico de fungos fitopatogênicos. In: ANDREWS, J. H.; HIRANO, S. S. (Eds.). **Ecologia microbiana das folhas**. Nova York: Springer, 1991. p. 87-110.
- ALTIERI, M. A. **Agroecologia**: bases científicas para uma agricultura sustentável. 3. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2012.
- ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I. **Agroecología**: teoría y práctica para una agricultura sustentable. México: PNUMA, 2000.
- ANISZEWSKI, T. **Alkaloids**: Chemistry, Biology, Ecology, and Applications. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2015.
- AQUINO, A. M. de; ASSIS, R. L. de. **Agroecologia**: princípios e técnicas para uma agricultura orgânica sustentável. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2012. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/8064219/mod_resource/content/1/Aquino_v2.pdf. Acesso em: 31 mar. 2026.
- ATLAS OF PLANT AND ANIMAL HISTOLOGY. **Cell wall**. Vigo: University of Vigo, 2025. Disponível em: <https://mmegias.webs.uvigo.es/02-english/5-celulas/ampliaciones/2-pared-celular.php>. Acesso em: 1 jul. 2025.

BABIKOVA, Z. *et al.* Underground signals carried through common mycelial networks warn neighbouring plants of aphid attack. **Ecology Letters**, v. 16, p. 835–843, 2013. Disponível em: https://www.sfu.ca/biology/courses/bisc830/Babicova_eta_2013.pdf. Acesso em: 31 mar. 2026.

BARBOL88. **Estômatos sob o microscópio**. [S. l.]: iStockPhoto, 25 nov. 2018. Disponível em: <https://www.istockphoto.com/br/foto/estomas-sob-o-microsc%C3%B3pio-gm1070157432-286303964?searchscope=image%2Cfilm>. Acesso em: 1 jul. 2025.

BARTLETT, L.; CONNOR, E. F. Exogenous phytohormones and the induction of plant galls by insects. **Arthropod-Plant Interactions**, v. 8, n. 4, p. 339–348, 2014.

BEATTIE, G. A.; LINDOW, S. E. A vida secreta dos patógenos bacterianos foliares nas folhas. **Annual Review of Phytopathology**, v. 33, p. 145–172, 1995.

BERGAMIN FILHO, A.; KIMATI, H.; AMORIM, L. **Manual de fitopatologia: princípios e conceitos**. [S. l.: s. n.], 1995.

BONCAN, D. A. T. *et al.* Terpenes and terpenoids in plants: Interactions with environment and insects. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 19, p. 7382, 2020.

BORGES, M.; LAUMANN, R. A.; MORAES, M. C. B. The chemical ecology of plant–insect interactions: Terpenoids as mediators of tritrophic interactions. **Plants**, v. 9, n. 10, p. 1–20, 2020.

BROWNSTEIN, M. J. A brief history of opiates, opioid peptides, and opioid receptors. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 90, n. 12, p. 5391–5393, 1993.

CALO, L.; GARCIA, I.; GOTOR, C.; ROMERO, L. C. Os pelos foliares influenciam a infecção por fungos fitopatogênicos e conferem maior resistência ao expressar uma α -1,3-glucanase de *Trichoderma*. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, p. 3911–3920, 2006.

CARNEIRO, R. G. *et al.* Are gall midge species (Diptera, Cecidomyiidae) host-plant specialists? **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 53, n. 3, p. 365–378, 2009.

CELEDON, J. M. *et al.* Gymnosperm glandular trichomes: expanded dimensions of the conifer terpenoid defense system. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 12464, 2020.

CHABOUSSOU, F. **Plantas doentes pelo uso de agrotóxicos: a teoria da trofobiose**. 2. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2006.

CHUN, S.-S. *et al.* Phenolic antioxidants from clonal oregano (*Origanum vulgare*) with antimicrobial activity against *Helicobacter pylori*. **Process Biochemistry**, v. 40, n. 2, p. 809–816, 2005.

CID, L. P. B.; TEIXEIRA, J. B. **Fisiologia Vegetal – Definições e Conceitos**. Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2017.

DICKE, M. Plant phenotypic plasticity in the phytobiome: a volatile issue. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 32, p. 17-23, 2016.

DICKE, M.; BALDWIN, I. T. The evolutionary context for herbivore-induced plant volatiles: beyond the 'cry for help'. **Trends in Plant Science**, v. 15, n. 3, p. 167-175, 2010.

EFFERTH, T. From ancient herb to modern drug: Artemisia annua and artemisinin for cancer therapy. **Seminars in Cancer Biology**, v. 46, p. 65-83, 2017.

ELEVAGRO. **Anatomia foliar: epiderme**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://elevagro.com/blog/anatomia-foliar-epiderme/>. Acesso em: 1 jul. 2025.

ESCOBAR, M. A.; DANDEKAR, A. M. Agrobacterium tumefaciens as an agent of disease. **Trends in Plant Science**, v. 8, n. 8, p. 380-386, 2003.

ESPINAS, N. A.; ALEXANDER, L.; CONRATH, U. Transgenerational acquired resistance in plants. **Plant Journal**, v. 88, n. 5, p. 757-766, 2016.

FARINAS, C. S. **A parede celular vegetal e as enzimas envolvidas em seu manuseio**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2011.

FERNANDES, C. de F. *et al.* **Mecanismos de defesa de plantas contra o ataque de agentes fitopatogênicos**. Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2009.

FORMIGA, A. T. *et al.* Plant development reprogramming by cynipid wasps: insights from histone modifications and hormone signalling. **Advances in Botanical Research**, v. 74, p. 413-447, 2015.

GARCIÓN, C.; LAMOTTE, O.; MÉTRAUX, J. P. Mecanismos de defesa contra patógenos: bioquímica e fisiologia. In: WALTERS, D.; NEWTON, A.; LYON, G. (Ed.). **Resistência induzida para defesa de plantas – uma abordagem sustentável para proteção de cultivos**. Oxford: Blackwell, 2007. p. 109-132.

GERSHENZON, J.; DUDAREVA, N. The function of terpene natural products in the natural world. **Nature Chemical Biology**, v. 3, n. 7, p. 408-414, 2007.

GIRON, D. *et al.* Cytokinins as key regulators in plant-microbe-insect interactions: connecting plant growth and defence. **Functional Ecology**, v. 30, n. 4, p. 516-527, 2016.

GLAS, J. J. *et al.* Tricomas glandulares de plantas como alvos para melhoramento ou engenharia de resistência a herbívoros. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 13, p. 17077-17103, 2012.

GOMES, E. V. *et al.* The compartmentalization of PR-proteínas in plant cells: mechanisms and functional implications. **Plant Cell Reports**, v. 38, n. 4, p. 425-439, 2019.

GONÇALVES, P. A. S. A importância da diversidade vegetal no manejo ecológico de insetos em agroecossistemas: uma revisão. **Scientific Electronic Archives**, v. 13, n. 6, p. 88-95, 2020. Disponível em: <https://scientificelectronicarchives.org/index.php/SEA/article/view/981>. Acesso em: 31 mar. 2026.

HARTLEY, S. E. The chemical composition of plant galls: are levels of nutrients and secondary compounds controlled by the gall-former? **Oecologia**, v. 113, n. 4, p. 492-501, 1998.

HARTMANN, T. From waste products to ecochemicals: Fifty years research of plant secondary metabolism. **Phytochemistry**, v. 68, n. 22-24, p. 2831-2846, 2007.

HEATH, M. C. Hypersensitive response-related death. **Plant Molecular Biology**, v. 44, p. 321-334, 2000.

HEIL, M. Indirect defence via tritrophic interactions. **New Phytologist**, v. 178, n. 1, p. 41-61, 2008.

HEIL, M.; KARBAN, R. Explaining evolution of plant communication by airborne signals. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 25, n. 3, p. 137-144, 2010.

HILTNER, L. Über neuere Erfahrungen und Probleme auf dem Gebiet der Bodenbakteriologie unter besonderer Berücksichtigung der Gründüngung und Brache. **Arb. Deut. Landwirtsch. Ges.**, v. 98, p. 59-78, 1904.

HOGENHOUT, S. A.; BOS, J. I. Effector proteins that modulate plant-insect interactions. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 14, n. 4, p. 422-428, 2011.

HOWE, G. A.; JANDER, G. Plant immunity to insect herbivores. **Annual Review of Plant Biology**, v. 59, p. 41-66, 2008.

IMBODEN, L.; TRAIL, F. Interações de superfície de *Fusarium graminearum* em cevada. **Molecular Plant Pathology**, v. 19, p. 1332-1342, 2018.

IWASA, K. *et al.* Antimicrobial activity of some 13-alkyl substituted *Protoberberinium* salts. **Planta Medica**, v. 67, n. 6, p. 527-531, 2001.

JARUPULA, S. *et al.* Microbiome as a Key Player in Sustainable Agriculture and Human Health. **Frontiers in Soil Science**, 2022.

JASKIEWICZ, M.; CONRATH, U.; PETERHÄNSEL, C. Chromatin modification acts as a memory for systemic acquired resistance in plants. **EMBO Reports**, v. 12, n. 1, p. 50-55, 2011.

JOHNSON, H. B. Pubescência de plantas: uma perspectiva ecológica. **Botanical Review**, v. 41, p. 233-258, 1975.

JONES, J. D. G.; DANGL, J. L. The plant immune system. **Nature**, v. 444, n. 7117, p. 323-329, 2006.

KARABOURNIOTIS, G.; BRESTA, P. Papéis protetores e defensivos de tricomas não glandulares contra estresses múltiplos: coordenação estrutura-função. **Journal of Forestry Research**, v. 31, p. 1-12, 2020.

KARIYAT, R. R. *et al.* A alimentação de tricomas glandulares e não glandulares das folhas afeta negativamente o crescimento e o desenvolvimento das lagartas *Manduca sexta*. **Arthropod-Plant Interactions**, v. 13, p. 321-333, 2019.

KIM, K. W. Tricomas vegetais como habitats microbianos e locais de infecção. **European Journal of Plant Pathology**, v. 154, p. 157-169, 2019.

KOPPENHÖFER, S. *et al.* Trichomes form genotype-specific microbial hotspots in the phyllosphere of tomato. **Environmental Microbiome**, v. 15, p. 1-15, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40793-020-00364-9>.

KORTEKAMP, A.; ZYPRIAN, E. O papel dos pelos na molhabilidade das folhas de videira (*Vitis* spp.). **Vitis**, v. 38, p. 101-105, 1999.

KOS, M. *et al.* Herbivore-mediated effects of plant volatiles on the attraction of natural enemies. **Journal of Chemical Ecology**, v. 39, n. 2, p. 239-249, 2013.

KROES, A. *et al.* Breeding for insect resistance in crops: the role of plant volatiles. **Current Opinion in Insect Science**, v. 19, p. 89-94, 2017.

LABANCA, E. R. G. *et al.* **Purificação parcial de elicitores presentes em *Saccharomyces cerevisiae***: atividade como indutores de resistência em pepino. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.

LAM, E. Controlled cell death, plant survival and development. **Nature Reviews Molecular Cell Biology**, v. 5, n. 4, p. 305-315, 2004.

LARSON, K. C.; WHITHAM, T. G. Competition between gall aphids and natural plant sinks: plant architecture affects resistance to galling. **Oecologia**, v. 109, n. 4, p. 575-582, 1997.

LIU, J.-J. *et al.* Phylogenetic analysis of PR-1 and PR-5 gene families reveals their ancient origin and conserved functions in plant defense. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, v. 28, n. 6, p. 702-715, 2015.

LUNA, E. *et al.* Next-generation systemic acquired resistance. **Plant Physiology**, v. 158, n. 2, p. 844-853, 2012.

MARTÍNEZ-ESPINOZA, A. D. *et al.* The Ustilaginales as plant pests and model systems. **Fungal Genetics and Biology**, v. 35, n. 1, p. 1-20, 2002.

MITHÖFER, A.; BOLAND, W. Plant defense against herbivores: chemical aspects. **Annual Review of Plant Biology**, v. 63, n. 1, p. 431-450, 2012.

MUÑOZ-LABRADO, J. *et al.* Phosphorus availability drives mycorrhiza-induced resistance in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 106092, 2022.

NACZK, M.; SHAHIDI, F. Extraction and analysis of phenolics in food. **Journal of Chromatography A**, v. 1054, n. 1-2, p. 95-111, 2004.

NOBLE, R. L. The discovery of the vinca alkaloids-chemotherapeutic agents against cancer. **Biochemistry and Cell Biology**, v. 68, n. 12, p. 1344-1351, 1990.

NYMAN, T.; JULKUNEN-TIITTO, R. Manipulation of the phenolic chemistry of willows by gall-inducing sawflies. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 97, n. 24, p. 13184-13187, 2000.

O'CONNOR, S. E. Engineering of secondary metabolism. **Annual Review of Genetics**, v. 49, p. 71-94, 2015.

PASCHOLATI, S. F.; LEITE, B. Mecanismos bioquímicos de resistência às doenças. In: LUZ, W. C. (ed.). **Revisão Anual de Patologia de Plantas**. Passo Fundo: RAPP, 1994. v. 2, p. 1-52.

PIETERSE, C. M. J. *et al.* Induced systemic resistance by beneficial microbes. **Annual Review of Phytopathology**, v. 52, p. 347-375, 2014.

PIETRARELLI, L.; BALESTRA, G. M.; VARVARO, L. Efeitos da chuva simulada em populações de tomateiro *Pseudomonas syringae* pv. **Journal of Plant Pathology**, v. 88, p. 245-251, 2006.

PRICE, P. W. *et al.* Adaptive nature of insect galls. **Environmental Entomology**, v. 16, n. 1, p. 15-24, 1987.

PRIMAVESI, A. M. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. 2. ed. São Paulo: Nobel, 2016.

PRIMAVESI, A. M. **Manejo ecológico de pragas e doenças: técnicas alternativas para a produção agropecuária e defesa do meio ambiente**. São Paulo: Expressão Popular, 2016.

RAMAN, A. *et al.* **Biology, ecology, and evolution of gall-inducing arthropods**. [S. l.]: Science Publishers, 2005.

RAMAN, A. Morphogenesis of insect-induced plant galls: facts and questions. **Flora**, v. 206, n. 6, p. 517-533, 2011.

REINA-PINTO, J. J.; YEPHREMOV, A. Lipídios de superfície e defesas de plantas. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 47, p. 540-549, 2009.

ROSS, A. F. Systemic acquired resistance induced by localized virus infections in plants. **Virology**, v. 14, p. 340-58, 1961.

SANTOS, A. T. B. dos *et al.* Chemical identification and insecticidal effect of *Tephrosia vogelii* essential oil against *Cerosipha forbesi*. **Crop Protection**, v. 139, p. 105329, 2020.

SCHULTZ, J. C. *et al.* The transcriptome of a gall-inducing wasp and its host plant reveals the mechanisms of gall development. **Molecular Ecology**, v. 28, n. 5, p. 1125-1141, 2019.

SHEPHERD, R. W.; WAGNER, G. J. Proteínas de filoplano: defesas emergentes na linha de frente aérea? **Trends in Plant Science**, v. 12, p. 51-56, 2007.

SHORTHOUSE, J. D. *et al.* Gall-inducing insects - Nature's most sophisticated herbivores. **Basic and Applied Ecology**, v. 6, n. 5, p. 407-411, 2005.

SIMPLÍCIO, V. dos S.; CONCE, M.; DALLAGNOL, L. J. Tricomas: defesa ou vulnerabilidade para a planta na interação com microrganismos? **RAPP – Revisão Anual de Patologia em Plantas**, v. 28, 2022.

SOUSA, C. M. de M. *et al.* Fenóis totais e atividade antioxidante de cinco plantas medicinais. **Química Nova**, v. 30, p. 351-355, 2007.

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

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

SPOOREN, J. *et al.* Plant-driven assembly of disease-suppressive soil microbiomes. **Annual Review of Phytopathology**, v. 62, p. 1-30, 2024. Disponível em: DOI: 10.1146/annurev-phyto-021622-100127. Acesso em: 31 mar. 2026.

STANGARLIN, J. R. *et al.* A defesa vegetal contra fitopatógenos. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 10, n. 1, p. 18-18, 2011.

STEPPUHN, A. *et al.* Nicotine's defensive function in nature. **PLoS Biology**, v. 2, n. 8, e217, 2004.

STONE, G. N. *et al.* The population biology of oak gall wasps (Hymenoptera: Cynipidae). **Annual Review of Entomology**, v. 47, p. 633-668, 2002.

STONE, G. N.; SCHÖNROGGE, K. The adaptive significance of insect gall morphology. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 18, n. 10, p. 512-522, 2003.

SUFFNESS, M. **Taxol: Science and Applications.** Boca Raton: CRC Press, 1995.

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

TAKABAYASHI, J.; DICKE, M.; POSTHUMUS, M. A. Volatile herbivore-induced terpenoids in plant-mite interactions. **Journal of Chemical Ecology**, v. 20, p. 1329-1354, 1994.

THOLL, D. Biosynthesis and biological functions of terpenoids in plants. **Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology**, v. 148, p. 63-106, 2015.

TOOKER, J. F. *et al.* Gall insects can avoid and alter indirect plant defenses. **New Phytologist**, v. 178, n. 3, p. 657-671, 2008.

TOOKER, J. F.; HELMS, A. M. Phytohormone dynamics associated with gall insects. **Journal of Chemical Ecology**, v. 40, n. 7, p. 742-753, 2014.

TORRES, M. A. *et al.* Reactive oxygen species signaling in response to pathogens. **Plant Physiology**, v. 141, n. 2, p. 373-378, 2006.

TU, Y. Artemisinin-A Gift from Traditional Chinese Medicine to the World (Nobel Lecture). **Angewandte Chemie International Edition**, v. 55, n. 35, p. 10210-10226, 2016.

VAN LOON, L. C. *et al.* Significance of inducible defense-related proteins in infected plants. **Annual Review of Phytopathology**, v. 44, p. 135-162, 2006.

VLOT, A. Corina *et al.* Systemic propagation of immunity in plants. **New Phytologist**, v. 229, n. 3, p. 1234-1250, 2021.

VRANOVA, E. *et al.* Network analysis of the MVA and MEP pathways for isoprenoid synthesis. **Annual Review of Plant Biology**, v. 64, p. 665-700, 2013.

WAGNER, G. J. Tricomas glandulares secretores: mais do que apenas pelos. **Plant Physiology**, v. 96, p. 675-679, 1991.

WANG, X.; SHEN, C.; MENG, P.; TAN, G.; LV, L. Analysis and review of trichomes in plants. **BMC Plant Biology**, v. 21, p. 70, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12870-021-02840-x>

WANG, X.; ZHU, S. *et al.* Development and utilization of trichomes in plants. **BMC Plant Biology**, v. 21, n. 1, p. 1-22, 2021.

WERKER, E. Diversidade e desenvolvimento de tricomas. **Advances in Botanical Research**, v. 31, p. 1-35, 2000.

WINK, M. Interference of alkaloids with neuroreceptors and ion channels. **Bioactive Natural Products**, v. 11, p. 3-129, 2000.

WINK, M. Plant secondary metabolites modulate insect behavior-steps toward addiction? **Frontiers in Physiology**, v. 9, p. 364, 2018.

ZIEGLER, J.; FACCHINI, P. J. Alkaloid biosynthesis: metabolism and trafficking. **Annual Review of Plant Biology**, v. 59, p. 735-769, 2008.

CAPÍTULO 3

Sistemas de produção integrados como estratégia para o conforto térmico e a sustentabilidade na bovinocultura leiteira

Isabela Berbert da Guia, Krisley Camila Morais Lopes, Aparecida de Fátima Madella de Oliveira, Carla Sardinha de Oliveira, Willian Moreira da Costa, Atanásio Alves do Amaral, Maurício Novaes Souza

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-45-9.c3>

Resumo

A bovinocultura leiteira no Brasil, desenvolvida majoritariamente em regiões tropicais, enfrenta desafios relacionados ao estresse térmico e à degradação das pastagens, comprometendo o bem-estar animal e o desempenho produtivo. Nesse contexto, os sistemas de produção integrados emergem como alternativa sustentável, promovendo melhorias nas condições ambientais e produtivas. Sistemas como a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e os sistemas agroflorestais (SAFs) favorecem a diversificação produtiva e a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Entre eles, os sistemas silvipastoris (SSPs) destacam-se por integrar árvores, forrageiras e animais em uma mesma área, contribuindo para a formação de microclimas mais amenos. O componente arbóreo proporciona sombreamento, reduzindo a carga térmica sobre os animais e influenciando positivamente suas respostas fisiológicas e comportamentais, com reflexos no conforto térmico e na produtividade. Além disso, esses sistemas auxiliam na recuperação de áreas degradadas e na conservação dos recursos naturais. Este estudo analisa, por meio de revisão de literatura, a relação entre sombreamento, conforto térmico e bem-estar de bovinos leiteiros, evidenciando que sistemas integrados favorecem ambientes mais equilibrados, resilientes e alinhados às demandas por sustentabilidade na pecuária tropical.

Palavras-chave: Estresse térmico. Bem-estar animal. Sombreamento. Pastagens degradadas. Sistemas integrados.

1. Introdução

A produção de leite se constitui como uma atividade de grande relevância para o setor agropecuário brasileiro, desempenhando um papel significativo na geração de emprego e renda, além de contribuir para a segurança alimentar. Segundo o IBGE (2024a), o Brasil produziu, em 2024, cerca de 35,7 bilhões de litros de leite. As regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul se destacam na produção leiteira no país.

Ao contrapor dados da pecuária leiteira nos anos de 2004 e 2024, evidencia-se uma transformação importante na dinâmica desse setor. O número de vacas ordenhadas diminuiu ao longo do período; no entanto, houve um aumento expressivo na produção de leite, o que demonstra a elevação da produtividade por animal. Essa taxa passou de aproximadamente 1.172 litros/vaca/ano, em 2004, para 2.360 litros/vaca/ano, em 2024 (IBGE, 2005; IBGE, 2024b).

Esse cenário evidencia não apenas o avanço tecnológico da atividade, mas também a necessidade de adequação dos sistemas produtivos às condições ambientais, especialmente em regiões tropicais, diante das alterações ambientais e das mudanças no perfil de consumo, cada vez mais atreladas a questões de bem-estar e procedência dos produtos.

Observa-se que a quantidade de leite produzida por animal/ano praticamente dobrou em 20 anos. Esse dado indica um processo de intensificação produtiva, possivelmente relacionado ao melhoramento genético, à utilização de tecnologias no manejo e na ordenha, a melhorias sanitárias e nutricionais, além de um manejo eficiente dos rebanhos.

Nesse contexto, os bovinos leiteiros apresentam elevada sensibilidade às variações ambientais. Essas condições afetam a homeostase dos animais, sendo necessárias adaptações fisiológicas para o retorno ao nível basal. Quando associadas ao aumento da temperatura, essas variações configuram um quadro de estresse térmico.

O estresse térmico impacta diretamente o bem-estar dos bovinos e compromete a produtividade dos animais. Essa condição acarreta aumento no consumo de água, diminuição no consumo de alimento, diminuição do

desenvolvimento, da produção de leite e da reprodução. A temperatura limite de conforto térmico para bovinos europeus é de 16 °C e, para os indianos, 27 °C, o que demonstra que esses animais, no Brasil, estão submetidos a condições que favorecem o desconforto térmico (Azevedo *et al.*, 2005; Azevêdo; Alves, 2009; Andrade *et al.*, 2023; Daltro *et al.*, 2020; Bento; Limberger, 2025), uma vez que as temperaturas médias locais giram em torno de 25 °C (INMET, 2026) (Figura 1).

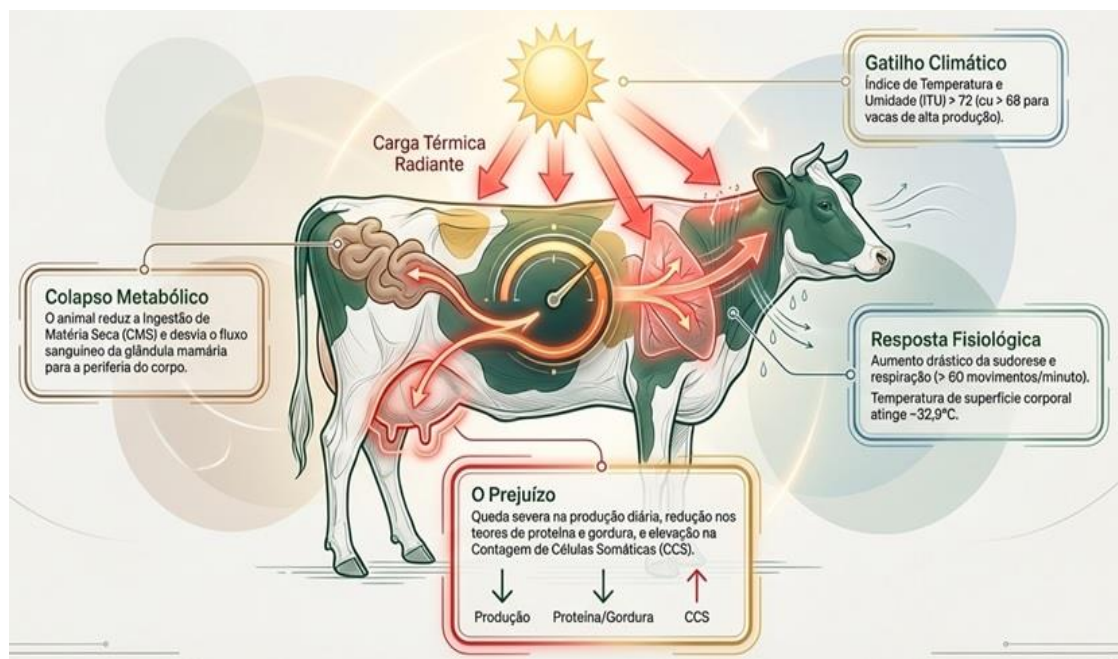


Figura 1. Dinâmica do estresse térmico em vacas leiteiras: indicadores de desconforto e adaptação. Fonte: Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Além das questões relacionadas ao conforto térmico, observa-se que grande parte dos sistemas de produção leiteira no Brasil é baseada em pastagens, frequentemente conduzidas em regime extensivo. Esse modelo, quando associado a manejo inadequado e à exposição contínua à radiação solar, contribui para a degradação das áreas forrageiras, reduzindo sua capacidade produtiva e comprometendo a sustentabilidade da atividade (Dias-Filho, 2011; Tao *et al.*, 2020).

Nesse contexto, o bem-estar animal (BEA) assume papel central, uma vez que está diretamente relacionado à produtividade, à qualidade do leite e às condições de vida dos animais. A adoção de práticas adequadas de manejo,

aliada à melhoria das condições ambientais, torna-se essencial para minimizar os efeitos do estresse térmico e promover sistemas de produção mais eficientes e sustentáveis (Beggs *et al.*, 2019; Costa; Ceballos, 2021).

Diante dessa realidade, os sistemas silvipastoris (SSPs) destacam-se como uma alternativa promissora, por integrarem árvores, pastagens e animais em um mesmo ambiente produtivo (Figura 2). Esses sistemas favorecem a formação de microclimas mais amenos, contribuindo para a redução do estresse térmico, além de promoverem a recuperação de áreas degradadas e o uso mais sustentável dos recursos naturais (Franke; Furtado, 2001; Pezzopane *et al.*, 2019).

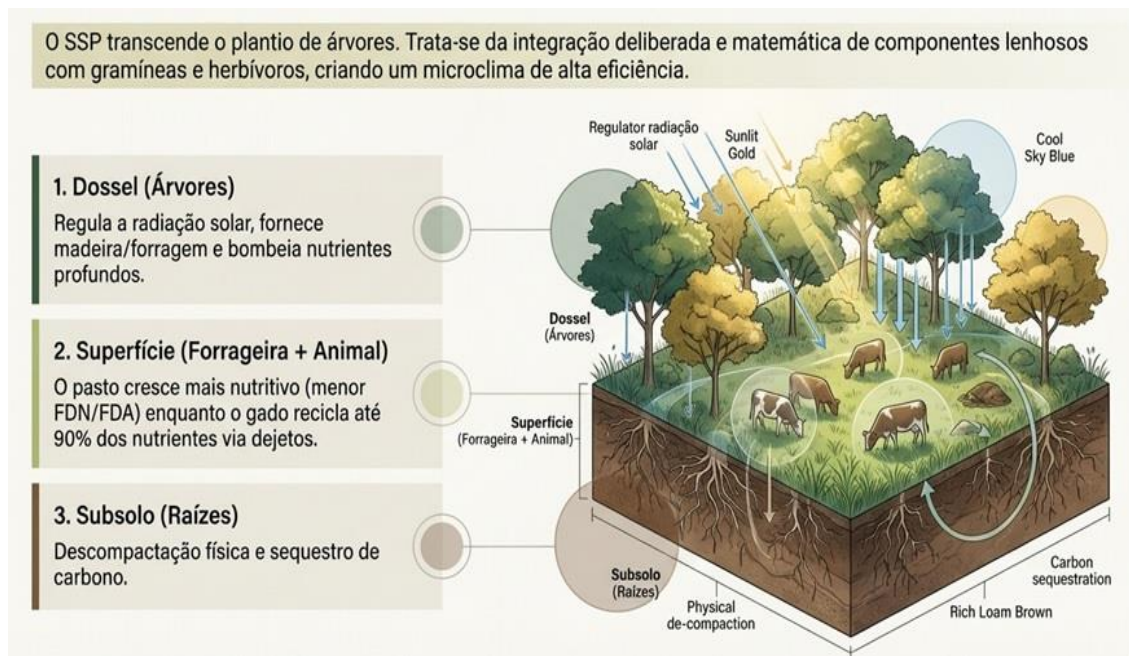


Figura 2. Configuração de sistemas silvipastoris para a promoção de microclimas e conforto térmico. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Nesse contexto, o presente capítulo objetiva analisar os efeitos dos sistemas silvipastoris no conforto térmico e no bem-estar de bovinos leiteiros, bem como sua relevância para a promoção da sustentabilidade em sistemas produtivos tropicais.

2. O bem-estar animal em bovinos leiteiros

O bem-estar animal (BEA) tem se consolidado como um elemento fundamental nos sistemas de produção, estando diretamente relacionado à produtividade, à qualidade dos produtos e às condições de vida dos animais. De forma geral, o conceito de bem-estar pode ser compreendido como o estado em que o animal se encontra em relação ao ambiente, envolvendo aspectos físicos, fisiológicos e comportamentais (OIE, 2015).

O bem-estar animal se constitui como um elemento central para sustentabilidade, produtividade e qualidade. O conceito se trata do estado do animal diante da sua interação com o ambiente, incluindo respostas comportamentais, alterações fisiológicas e processos cerebrais. Assim, vai além da condição de saúde e abrange experiências de sentimentos positivos e negativos (Broom, 2008; Costa; Nogueira 2011).

Nessa perspectiva, o modelo dos “Cinco Domínios” do bem-estar animal compreende cinco dimensões interligadas: nutrição, ambiente físico, saúde, comportamento e estado mental (Figura 3).

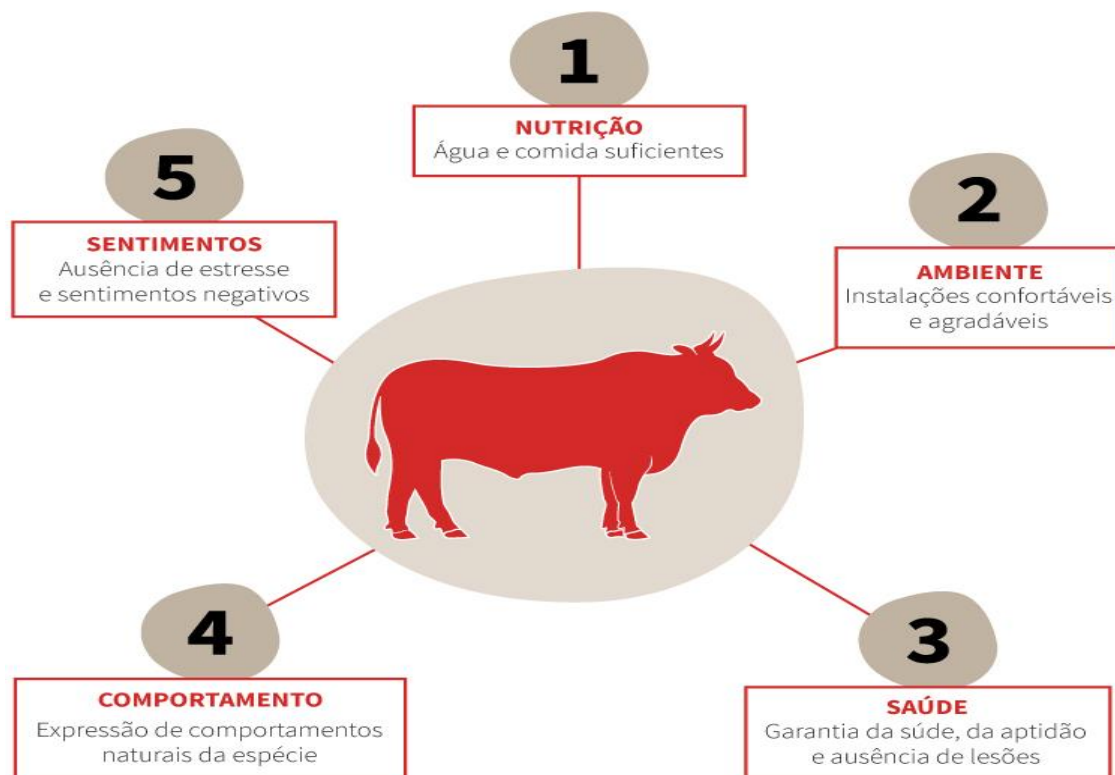


Figura 3. Inter-relação entre os domínios físicos e o estado mental no bem-estar de bovinos. Fonte: Minervafoods.com, 2024.

Os domínios físico-funcionais, nutrição, ambiente físico, saúde e comportamento, exercem influência direta sobre o estado mental dos animais, o qual integra experiências positivas e negativas, determinando, em última instância, o seu nível de bem-estar (Criando Conexões, s.d.; Mellor, 2016).

A nutrição refere-se à adequação da alimentação e da hidratação; o ambiente físico abrange aspectos como condições térmicas, disponibilidade de abrigo e espaço; a saúde diz respeito à presença ou ausência de doenças, lesões e dor; e o comportamento envolve a possibilidade de expressão de padrões naturais e interações típicas da espécie. Já o estado mental corresponde às experiências afetivas decorrentes da interação entre esses domínios, podendo ser positivas ou negativas (Mellor; Reid, 1994; Mellor, 2016).

Na bovinocultura leiteira, o bem-estar animal assume papel ainda mais relevante, uma vez que vacas em lactação dependem de condições adequadas para expressar plenamente seu potencial produtivo e reprodutivo. Nesse sentido, práticas de manejo, qualidade das instalações e a interação humano-animal influenciam diretamente o desempenho dos animais, podendo tanto favorecer quanto comprometer sua produtividade (Zanin; Bichel; Mangilli, 2016; Beggs *et al.*, 2019; Costa; Ceballos, 2021).

Em muitos sistemas de produção ainda se observa uma abordagem centrada predominantemente no funcionamento biológico dos animais, com foco no tratamento de doenças e na manutenção de índices produtivos. No entanto, a negligência de fatores relacionados ao ambiente e ao comportamento pode resultar em estresse, impactando negativamente as funções fisiológicas e o desempenho produtivo (Fraser *et al.*, 2009; Costa; Ceballos, 2021).

Dessa forma, torna-se essencial a adoção de práticas que considerem o animal de forma integrada, contemplando desde o manejo diário até as condições ambientais (Figura 4). A interação adequada entre humanos e animais, realizada de forma contínua no cotidiano das propriedades, contribui para a redução do estresse e para a melhoria do bem-estar, refletindo positivamente na produção (Pereira; Madella-Oliveira, 2020; Santos; Neves; Ribeiro, 2021).



Figura 4. Estratégias de mitigação do estresse térmico em sistemas de produção tropical. Fonte: A Pecuária de Precisão, 2021.

De acordo com Pereira e Madella-Oliveira (2020), o bem-estar animal não se restringe aos aspectos produtivos, estando igualmente associado às condições de criação e às interações sociais estabelecidas entre os indivíduos. Evidências científicas indicam que fatores como manejo, ambiente e sistema de produção exercem influência direta sobre o desenvolvimento, o comportamento e a capacidade adaptativa dos animais, especialmente em fases críticas, como o aleitamento e a desmama (Figura 5).

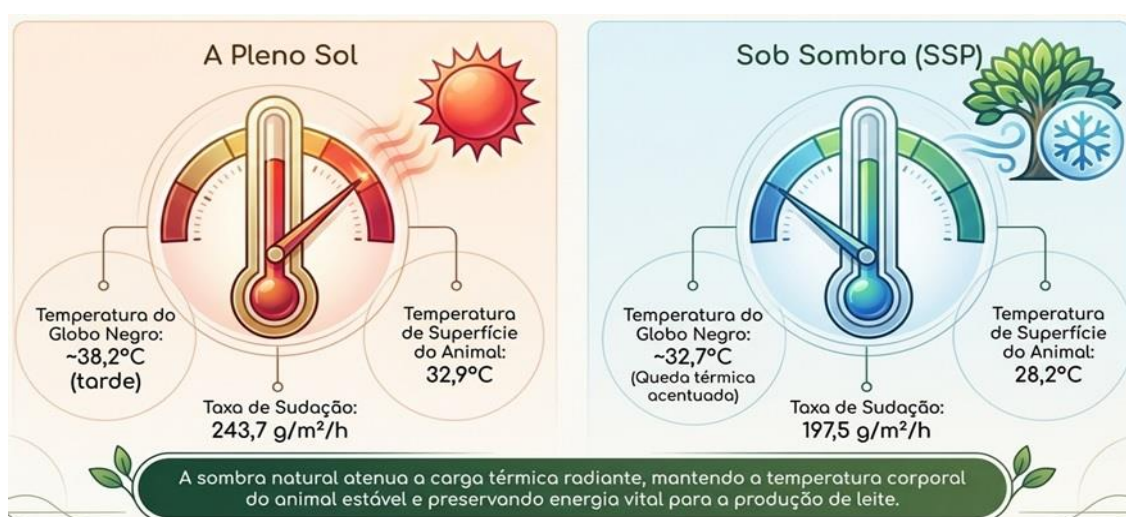


Figura 5. Impacto da disponibilidade de sombra nos indicadores bioclimáticos e produtivos. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Dentre os principais fatores que afetam o bem-estar de bovinos leiteiros, destaca-se o conforto térmico, particularmente em regiões tropicais. A exposição prolongada a temperaturas elevadas pode comprometer a homeostase, afetando negativamente a saúde, o desempenho produtivo e as funções fisiológicas dos animais. Nesse sentido, torna-se imprescindível a adoção de estratégias que mitiguem os efeitos do estresse térmico e promovam condições adequadas de ambiência, favorecendo o equilíbrio fisiológico e o desempenho zootécnico (Beggs *et al.*, 2019; Souza Reis *et al.*, 2021).

3. Estresse térmico e estratégias de mitigação em sistemas produtivos

O estresse térmico em bovinos leiteiros está relacionado à dificuldade do organismo em dissipar o calor para o ambiente, resultando em alterações fisiológicas como aumento da frequência respiratória (FR), elevação da temperatura retal (TR) e redução do consumo de matéria seca (MS). Essas respostas comprometem diretamente a produção, a reprodução e a qualidade do leite, sendo mais evidentes em animais de alta produtividade (Fabris *et al.*, 2019; Kumar *et al.*, 2020; Pereira; Madella-Oliveira, 2020) (Figura 6).

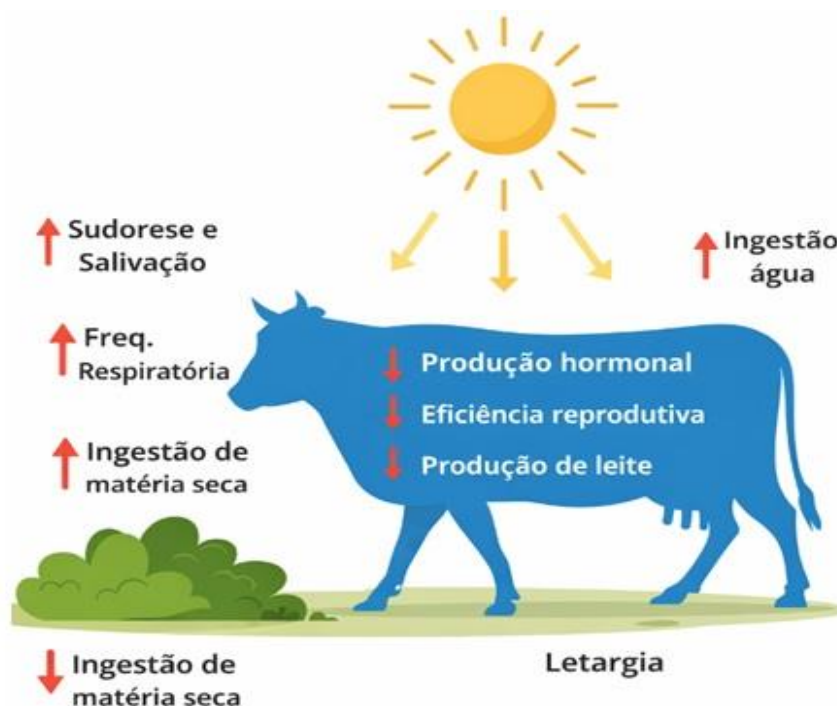


Figura 6. Dinâmica das respostas fisiológicas involuntárias frente à carga térmica elevada. Fonte: Adaptado de Santos e Leão, 2017.

Adicionalmente, o desempenho produtivo dos bovinos está intrinsecamente relacionado à sua permanência na zona de termoneutralidade, definida como a faixa de temperatura ambiente na qual o animal não necessita acionar mecanismos fisiológicos adicionais para manter a temperatura corporal. Fora dessa faixa, há aumento do gasto energético destinado à termorregulação, o que compromete tanto o desempenho produtivo quanto o bem-estar animal (Azevêdo; Alves, 2009; Andrade *et al.*, 2023).

Segundo os mesmos autores, diante de condições térmicas adversas, os animais acionam diferentes mecanismos fisiológicos e comportamentais com o objetivo de restabelecer a homeostase térmica. Entre as respostas fisiológicas, destacam-se o aumento da frequência respiratória e da sudorese, essenciais para a dissipação de calor. Do ponto de vista comportamental, observa-se a redução da atividade durante os períodos mais quentes do dia, com busca por áreas sombreadas e ajuste no padrão de pastejo, que passa a ocorrer preferencialmente em horários de menor carga térmica, como no início da manhã e ao final da tarde (Figura 7).

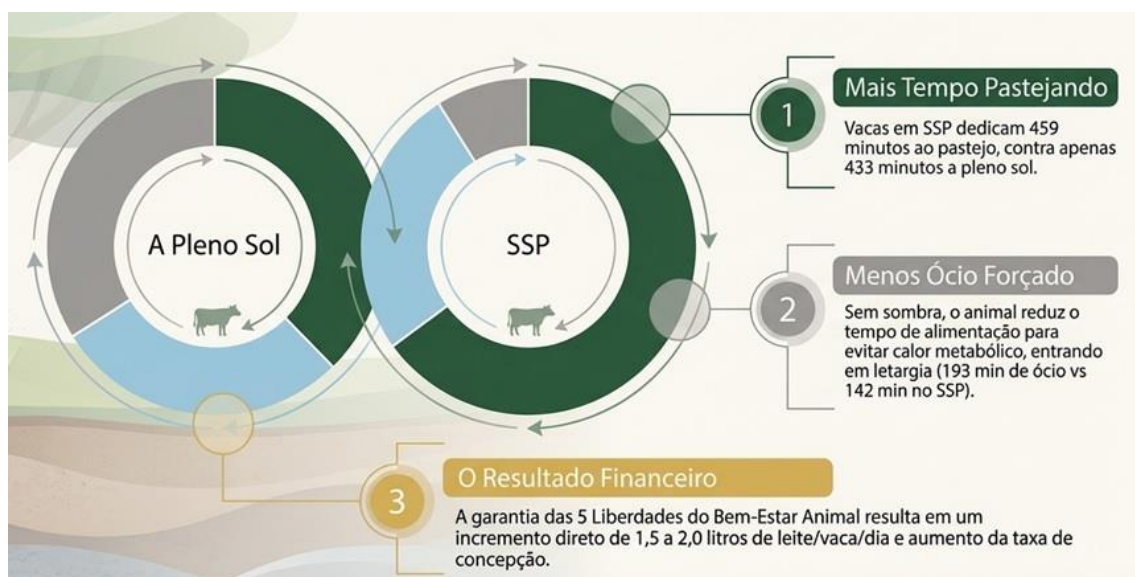


Figura 7. Interdependência entre o comportamento animal e o desempenho na bovinocultura leiteira. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Entretanto, tais respostas podem acarretar desequilíbrios fisiológicos, afetando processos metabólicos e reduzindo o fluxo sanguíneo destinado ao

úbere, com impactos negativos sobre a produção de leite (Allen *et al.*, 2015). Além disso, em condições de estresse térmico, verifica-se diminuição no consumo de matéria seca, uma vez que a ingestão alimentar está associada ao incremento do calor metabólico. Assim, os animais tendem a reduzir a ingestão nos períodos mais quentes, priorizando a manutenção da homeotermia⁸ em detrimento da produtividade.

Adicionalmente, o estresse térmico pode ocasionar alterações na composição do leite, com redução nos teores de proteína, gordura e lactose, além de comprometer a saúde dos animais, aumentando a suscetibilidade a enfermidades, como a mastite (Pragna *et al.*, 2017; Fabris *et al.*, 2019). A avaliação desse estresse é comumente realizada por meio de parâmetros fisiológicos, como temperatura retal e frequência respiratória, associados a variáveis ambientais, a exemplo da temperatura do ar e da umidade relativa (Kaufman; Saxton; Rius, 2018; Suzuki, 2021).

Nesse contexto, a disponibilidade de sombra configura-se como um fator essencial para a promoção do conforto térmico e do bem-estar animal. A inserção do componente arbóreo nos sistemas produtivos contribui para a formação de microclimas mais favoráveis, ao reduzir a incidência direta de radiação solar e proporcionar condições ambientais mais adequadas aos bovinos.

A integração entre árvores, pastagens e animais, característica dos sistemas silvipastoris (SSPs), destaca-se como uma estratégia eficiente para mitigar os efeitos do estresse térmico. Tais sistemas promovem melhorias no conforto térmico, nas respostas fisiológicas e comportamentais dos animais, além de contribuírem para o incremento da produtividade (Martins *et al.*, 2020; Rosso, 2024).

Ademais, para além dos sistemas silvipastoris, outras formas de integração vêm sendo adotadas com o objetivo de ampliar a sustentabilidade dos sistemas produtivos, destacando-se os sistemas agroflorestais, que incorporam maior diversidade de espécies e funções ecológicas.

⁸ É a capacidade de certos animais, como aves e mamíferos (incluindo humanos), de manter sua temperatura corporal interna relativamente constante, independentemente das variações térmicas do ambiente.

4. Sistemas de produção integrados

Os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) configuram-se como uma estratégia relevante para a adoção de práticas sustentáveis na agropecuária, ao promoverem a integração de diferentes componentes produtivos em uma mesma área. Esses sistemas contribuem para a melhoria das condições edáficas, o incremento da biodiversidade, a otimização do uso dos recursos naturais e a mitigação dos impactos ambientais associados à atividade agropecuária (Abadias; Fonseca; Arbos, 2020).

De acordo com Machado, Balbino e Ceccon (2011), a ILPF consiste em uma estratégia de produção que integra atividades agrícolas, florestais e pecuárias em um mesmo espaço, podendo ser implantada de forma consorciada, em sucessão ou por meio de rotação de culturas, configurando-se como uma prática de base sustentável.

Nesse contexto, além dos benefícios relacionados ao conforto térmico e à sustentabilidade dos sistemas produtivos, destaca-se o potencial desses sistemas na recuperação de áreas degradadas (Figura 8). A recuperação de pastagens possibilita melhor aproveitamento da área, promovendo não apenas a restauração das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, mas também a melhoria de sua estrutura, com destaque para a descompactação, o aumento da porosidade e a maior infiltração de água.

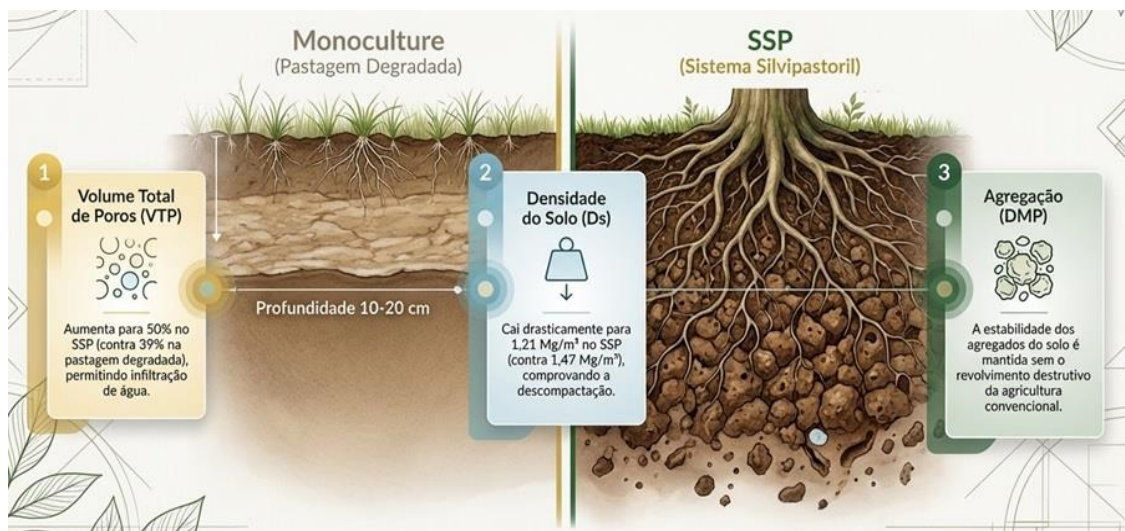


Figura 8. Atributos físicos e recuperação da funcionalidade ecossistêmica em sistemas silvipastoris. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Esses processos favorecem o desenvolvimento radicular, a atividade biológica do solo e a ciclagem de nutrientes, contribuindo para o aumento da capacidade de suporte e, conseqüentemente, para a produção de proteína animal. Ademais, essa abordagem reduz a necessidade de abertura de novas áreas, colaborando para a conservação da fauna e da flora (Souza, 2022).

Os sistemas de integração podem ser classificados em quatro modalidades principais: (I) integração lavoura-pecuária (agropastoril); (II) integração lavoura-pecuária-floresta (agrossilvipastoril); (III) integração pecuária-floresta (silvipastoril); e (IV) integração lavoura-floresta (silviagrícola). A comparação entre essas modalidades pode ser observada na Tabela 1 (Machado; Balbino; Ceccon, 2011).

Considerando suas especificidades, esses sistemas devem ser planejados de forma criteriosa, contemplando aspectos econômicos, sociais e ambientais, de modo a garantir sua viabilidade e eficiência, podendo ser adotados em diferentes perfis de propriedades rurais.

Tabela 1. Principais modalidades de sistemas de integração produtivos.

Sistema	Componentes	Forma de integração	Características principais
ILP (Integração Lavoura-Pecuária)	Lavoura + Pecuária	Rotação, sucessão ou consórcio	Integra produção de grãos e forragem, permitindo recuperação de pastagens e melhoria do solo
IPF (Integração Pecuária-Floresta / Silvopastoril)	Pecuária + Floresta	Consórcio	Associa árvores à pastagem, promovendo sombreamento, conforto térmico e diversificação produtiva
ILF (Integração Lavoura-Floresta)	Lavoura + Floresta	Consórcio, rotação ou sucessão	Integra culturas agrícolas com espécies arbóreas, favorecendo uso eficiente do solo e diversificação
ILPF (Integração Lavoura-Pecuária-Floresta)	Lavoura + Pecuária + Floresta	Rotação, sucessão e consórcio	Sistema mais complexo e completo, com maior diversificação, sinergia entre componentes e sustentabilidade

Fonte: Adaptado de Kluthcouski *et al.*, 2013.

A adoção de sistemas integrados pode ser compreendida, ainda, como uma estratégia de mitigação de riscos na atividade agropecuária, uma vez que a produção rural está sujeita a variações climáticas e oscilações de mercado. Nesse contexto, a diversificação produtiva proporcionada por esses sistemas contribui para maior estabilidade econômica, ao reduzir a dependência de uma única fonte de renda (EMBRAPA, 2013).

Nos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta, torna-se possível a combinação de diferentes atividades em uma mesma área, como a produção de grãos, carne, leite e madeira, o que favorece a otimização do uso da terra e dos recursos disponíveis. Essa característica contribui para o aumento da eficiência dos sistemas produtivos, além de potencializar o retorno econômico por unidade de área (Figura 9).

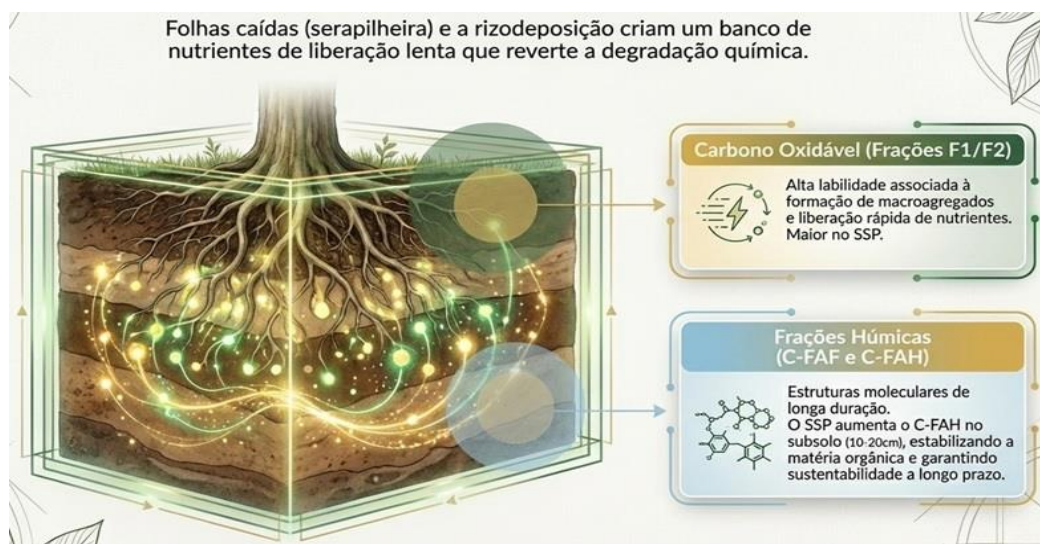


Figura 9. Potencial de estocagem de carbono e recuperação da fertilidade em sistemas silvipastoris. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Adicionalmente, conforme Oliveira *et al.* (2020), a integração lavoura-pecuária-floresta pode ser compreendida como uma estratégia de intensificação sustentável, uma vez que possibilita o incremento da produtividade sem a necessidade de expansão de novas áreas agrícolas. Tal abordagem promove o uso mais eficiente da terra, ao mesmo tempo em que contribui para a conservação dos recursos naturais e a redução dos impactos ambientais associados à atividade agropecuária.

Dentre as diferentes modalidades de integração, destacam-se os sistemas silvipastoris (SSPs), também denominados integração pecuária-floresta (IPF), caracterizados pela associação entre árvores, pastagens e animais em um mesmo ambiente produtivo. Esses sistemas estabelecem interações sinérgicas entre seus componentes, promovendo benefícios mútuos que favorecem tanto a produtividade quanto a sustentabilidade, conforme ilustrado na Figura 10 (Franke; Furtado, 2001).

Os sistemas silvipastoris (SSPs) contribuem de forma significativa para a melhoria das condições ambientais, sobretudo por meio do sombreamento proporcionado pelo componente arbóreo. A presença de árvores reduz a incidência direta de radiação solar, promovendo a formação de microclimas mais amenos e favorecendo o conforto térmico dos animais. Essa característica assume especial relevância em regiões tropicais, onde o estresse térmico se configura como um dos principais entraves à eficiência produtiva e ao bem-estar na bovinocultura leiteira (Pezzopane *et al.*, 2019).

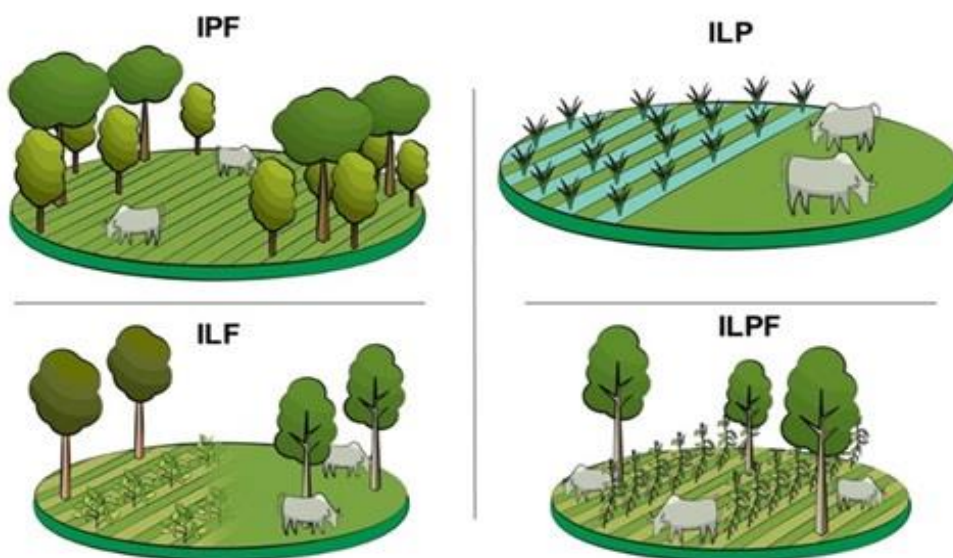


Figura 10. Modelos de integração lavoura-pecuária-floresta e suas vertentes agroflorestais. Fonte: Adaptado de Globo Rural, 2016.

Paralelamente, a adoção de sistemas agroflorestais (SAFs) tem sido reconhecida como uma estratégia complementar para o fortalecimento da sustentabilidade e da resiliência dos sistemas produtivos. De acordo com a EMBRAPA (2025), esses sistemas caracterizam-se pela integração intencional

de componentes arbóreos, agrícolas e, em determinados contextos, pecuários, promovendo maior eficiência no uso dos recursos naturais. Além disso, favorecem a diversificação das atividades produtivas, contribuindo para a estabilidade ecológica e econômica dos agroecossistemas (Figura 11).

No contexto da bovinocultura leiteira, a inserção de sistemas agroflorestais (SAFs) amplia as possibilidades de integração produtiva ao incorporar componentes adicionais, como a apicultura. A presença de abelhas nesses sistemas desempenha papel fundamental na polinização de espécies vegetais, favorecendo o desenvolvimento das plantas e contribuindo para o aumento da biodiversidade local. Ademais, a produção de mel e de outros produtos apícolas configura-se como uma fonte complementar de renda, reduzindo a dependência exclusiva da atividade leiteira (EMBRAPA, 2025).



Figura 11. O ciclo virtuoso da integração: provisão de serviços ecossistêmicos e resiliência produtiva. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

A interação entre bovinos, árvores e abelhas evidencia o caráter multifuncional desses sistemas, nos quais diferentes componentes exercem funções complementares e interdependentes. Enquanto o componente arbóreo contribui para a atenuação da carga térmica e a melhoria das condições microclimáticas, os animais participam ativamente da ciclagem de nutrientes por

meio das excretas, e as abelhas atuam na manutenção de serviços ecossistêmicos essenciais, especialmente aqueles relacionados à polinização.

Além disso, esses sistemas desempenham papel relevante na conservação da biodiversidade, na formação de corredores ecológicos e no sequestro de carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Nesse sentido, a seleção adequada das espécies arbóreas, aliada ao manejo eficiente das interações entre os componentes do sistema, constitui fator determinante para o seu desempenho e sustentabilidade (Paciullo *et al.*, 2007).

A presença do componente arbóreo contribui significativamente para a melhoria das condições do solo, atuando na ciclagem de nutrientes, na conservação da umidade e na melhoria da estrutura física, além de favorecer a produção de forragem. Nesse contexto, a integração entre os diferentes componentes do sistema potencializa a eficiência produtiva, ao mesmo tempo em que promove a sustentabilidade ambiental.

Sob essa perspectiva, os sistemas agroflorestais (SAFs) configuram-se como uma alternativa promissora para a recuperação de áreas degradadas, especialmente por meio da combinação de espécies nativas e exóticas (Figura 12). Essa associação favorece o restabelecimento do equilíbrio químico, físico e biológico do solo, sendo frequentemente potencializada pelo uso de adubos verdes, que contribuem para o incremento da matéria orgânica, a proteção do solo e a melhoria de sua fertilidade (Mallmann *et al.*, 2018; Nascimento; Souza, 2022).

Inseridos nesse contexto, os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta, com ênfase nos sistemas silvipastoris, ampliam essa abordagem ao conciliarem produtividade, bem-estar animal e conservação dos recursos naturais. Dessa forma, configuram-se como uma estratégia relevante para a promoção de sistemas agropecuários mais sustentáveis, resilientes e eficientes.

Adicionalmente, esses sistemas favorecem a intensificação sustentável do uso da terra, ao promoverem sinergias ecológicas entre seus componentes, como a ciclagem de nutrientes, o aumento da matéria orgânica do solo e a melhoria do microclima. A presença de árvores contribui para a redução do estresse térmico dos animais, incremento da biodiversidade funcional e maior

estabilidade produtiva frente às variações climáticas. Sob a perspectiva econômica, a diversificação de produtos, tais como madeira, forragem e grãos, amplia as fontes de renda e dilui riscos produtivos. Assim, os sistemas silvipastoris não apenas aperfeiçoam o uso dos recursos naturais, mas também reforçam a transição para modelos agroecológicos, alinhados aos princípios da sustentabilidade e à adaptação às mudanças climáticas.



Figura 12. Integração do componente arbóreo: sinergia entre produção animal e serviços ecossistêmicos. Fonte: FEBRAPDP - Gabriel Faria/Embrapa, 2024.

5. Escolha das espécies arbóreas

A escolha das espécies arbóreas constitui um dos elementos centrais para o sucesso dos sistemas integrados, especialmente nos sistemas silvipastoris. A seleção deve considerar a adaptação às condições edafoclimáticas locais, o crescimento, a arquitetura da copa, a profundidade e distribuição do sistema radicular, bem como a compatibilidade com as espécies forrageiras (Nascimento; Souza, 2022).

De acordo com esses autores, espécies que promovem sombreamento moderado, sem comprometer a disponibilidade de luz para as pastagens, tendem a favorecer o equilíbrio do sistema. Além disso, árvores com potencial para fixação biológica de nitrogênio, produção de serapilheira e capacidade de ciclagem de nutrientes contribuem para a melhoria da fertilidade do solo,

reduzindo a dependência de insumos externos e promovendo maior sustentabilidade (Figura 12).

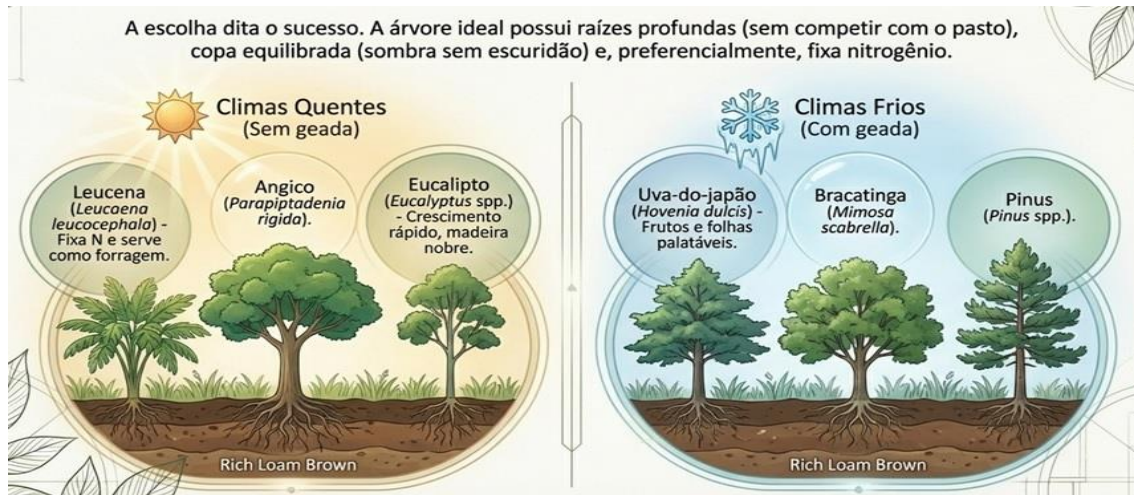


Figura 12. Características biofísicas desejáveis para espécies arbóreas em sistemas de produção sustentável. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

O arranjo espacial das árvores no sistema também exerce papel determinante sobre sua eficiência. A disposição das espécies arbóreas deve ser planejada de forma a aperfeiçoar a incidência de luz, a circulação de ar e a distribuição de sombra ao longo do dia, evitando tanto o sombreamento excessivo quanto a exposição direta dos animais à radiação solar (Souza, 2022).

Configurações como linhas simples ou múltiplas, renques ou faixas podem ser adotadas conforme os objetivos produtivos e as características da área. Um arranjo bem planejado contribui não apenas para o conforto térmico dos animais, mas também para o melhor aproveitamento das pastagens e para a mecanização das atividades, quando necessária (Figura 13).

Cuidados específicos devem ser adotados quando o estabelecimento de Sistemas Silvopastoris (SSPs) ocorre concomitantemente ao pastejo animal. Nessa fase inicial, as mudas arbóreas se encontram em elevado grau de vulnerabilidade, sendo suscetíveis a danos mecânicos causados pelo pisoteio, desfolha e quebra de ramos pelos animais. Dessa forma, torna-se imprescindível a adoção de estratégias de proteção física, como o uso de protetores individuais (tubetes, telas ou cercas), bem como o isolamento temporário das áreas recém-implantadas. Tais medidas visam assegurar o adequado desenvolvimento inicial

das espécies arbóreas, garantindo sua sobrevivência e estabelecimento no sistema (Figura 14).

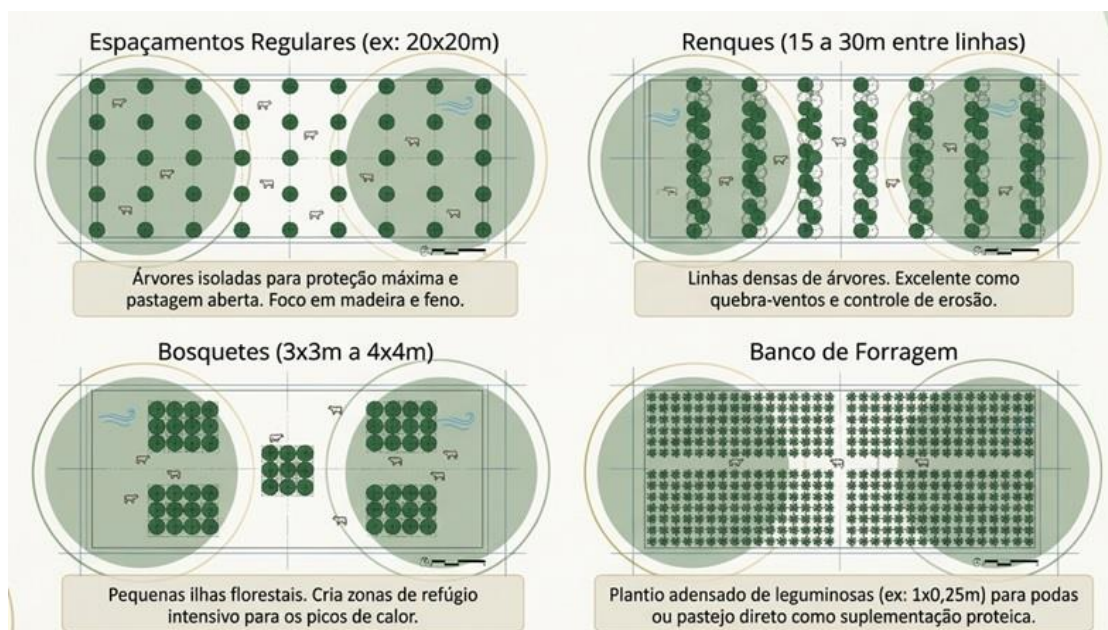


Figura 13. Arquitetura do sistema: opções de arranjos para a otimização do sombreamento e do microclima. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

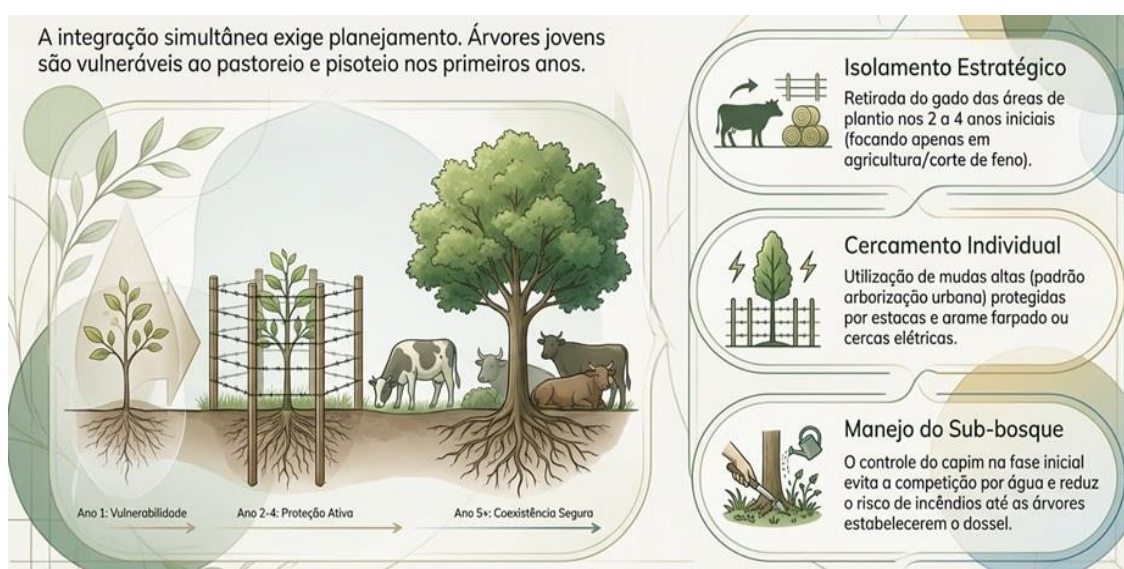


Figura 14. Manejo do estabelecimento arbóreo concomitante ao pastejo: dispositivos de proteção física. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Adicionalmente, o manejo do pastejo deve ser criteriosamente planejado, considerando a capacidade de suporte da área, o comportamento ingestivo das espécies animais e o estágio fenológico das plantas introduzidas. A adoção de sistemas de pastejo rotacionado pode contribuir significativamente para reduzir a pressão sobre as mudas, permitindo períodos de descanso que favoreçam sua recuperação e crescimento. O sucesso dos SSPs depende, portanto, da integração eficiente entre os componentes arbóreo, forrageiro e animal, exigindo planejamento técnico, monitoramento contínuo e ajustes adaptativos ao longo do tempo, de modo a promover a sustentabilidade e a funcionalidade do sistema produtivo.

O manejo das pastagens, por sua vez, é fundamental para garantir a produtividade e a longevidade do sistema. Práticas como o ajuste da carga animal, o manejo rotacionado e a escolha de espécies forrageiras adaptadas às condições de sombreamento são essenciais para manter o equilíbrio entre oferta e demanda de forragem. Ademais, o manejo adequado contribui para a manutenção da cobertura do solo, redução de processos erosivos e estímulo à atividade biológica. Quando conduzido de forma integrada aos demais componentes do sistema, o manejo das pastagens potencializa os benefícios ecológicos e produtivos, assegurando maior eficiência e sustentabilidade ao longo do tempo (Souza, 2022).

6. Considerações

A adoção de sistemas silvipastoris representa uma estratégia relevante para a produção leiteira em regiões tropicais, especialmente diante dos desafios impostos pelo estresse térmico e pela degradação das pastagens. Ao integrar árvores, pastagens e animais, esses sistemas favorecem a criação de ambientes mais equilibrados, contribuindo para a melhoria das condições térmicas e para o bem-estar dos bovinos. Além disso, a presença do componente arbóreo influencia diretamente o microclima, reduzindo a incidência de radiação solar e proporcionando condições mais adequadas para o desempenho produtivo dos animais.

Para além dos efeitos sobre o conforto térmico, observa-se que os sistemas integrados promovem melhorias ambientais importantes, como a recuperação da estrutura e fertilidade do solo, o aumento da biodiversidade e a otimização do uso dos recursos naturais. A diversificação dos componentes produtivos também contribui para maior estabilidade dos sistemas, tanto do ponto de vista ecológico quanto econômico, reduzindo a vulnerabilidade frente às variações climáticas e de mercado. Nesse sentido, tais sistemas vão além de uma alternativa produtiva, configurando-se como uma abordagem mais integrada e sustentável da atividade pecuária.

Sob a perspectiva econômica, destaca-se que esses sistemas possibilitam a diversificação das fontes de renda, por meio da produção simultânea de leite, carne, madeira, produtos florestais e, em alguns casos, produtos apícolas. Essa diversificação contribui para a diluição de riscos e para maior estabilidade financeira ao produtor, além de potencializar o retorno econômico por unidade de área. Adicionalmente, a melhoria das condições do solo e do microclima pode reduzir a necessidade de insumos externos, como suplementação alimentar e intervenções corretivas, resultando em menor custo de produção ao longo do tempo. A valorização de produtos oriundos de sistemas sustentáveis também pode representar um diferencial competitivo no mercado, agregando valor à produção.

Além disso, a diversidade de sistemas de integração, como a integração lavoura-pecuária (ILP), a integração pecuária-floresta (IPF) e a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), amplia as possibilidades de organização dos sistemas produtivos, permitindo sua adaptação às diferentes realidades regionais. Cada arranjo apresenta potencialidades específicas, seja na recuperação de áreas degradadas, na diversificação da produção, na melhoria do conforto térmico dos animais ou no aumento da eficiência do uso da terra. Essa flexibilidade torna os sistemas integrados uma alternativa estratégica não apenas do ponto de vista ambiental, mas também produtivo e econômico, contribuindo para a construção de sistemas mais equilibrados e sustentáveis na bovinocultura leiteira.

Dessa forma, destaca-se a necessidade de adoção de práticas de manejo adequadas e de um planejamento criterioso dos sistemas produtivos,

considerando as condições climáticas, edáficas e estruturais de cada região. A escolha das espécies arbóreas, o arranjo espacial e o manejo das pastagens são fatores que influenciam diretamente a eficiência desses sistemas e seus benefícios em longo prazo. Assim, os sistemas silvipastoris apresentam-se como uma alternativa estratégica para a construção de sistemas produtivos mais resilientes, eficientes e alinhados às demandas contemporâneas da pecuária leiteira.

Adicionalmente, é imperativo considerar a dimensão social e o potencial de sucessão familiar que a transição para sistemas mais complexos e sustentáveis promove. A modernização do manejo e a melhoria do ambiente de trabalho, proporcionada pelo conforto térmico e pela diversificação de atividades, conferem novo vigor e atratividade à bovinocultura leiteira. Ao transformar a propriedade em um ecossistema produtivo resiliente e tecnologicamente fundamentado, criam-se condições favoráveis para a retenção do jovem no campo e para a sucessão do negócio agropecuário. Assim, os sistemas integrados não apenas recuperam o solo e protegem o animal, mas também atuam como indutores de desenvolvimento humano e permanência das famílias nas comunidades rurais, fortalecendo o tecido social do campo frente às transformações do século XXI.

7. Referências

A PECUÁRIA DA PRECISÃO. **Bem-estar animal**: 11 dicas para garantir o conforto de bovinos leiteiros. 2021. Disponível em: <https://blog.apecuariadeprecisao.com.br/bem-estar-bovinos-de-leite/>. Acesso em: 29 out. 2024.

ABADIAS, I. M.; FONSECA, P. R.; ARBOS, C. H. Manejo da pecuária: uma análise sobre impactos ambientais. **Educamazônia**, v. 24, n. 1, p. 113-125, 2020.

ALLEN, J. D.; HALL, L. W.; COLLIER, R. J.; SMITH, J. F. Effect of core body temperature, time of day, and climate conditions on behavioral patterns of lactating dairy cows experiencing mild to moderate heat stress. **Journal of Dairy Science**, v. 98, n. 1, p. 118-127, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14850>.

ANDRADE, R. G.; GARCIA, L. C. S.; HOTT, M. C.; MAGALHÃES JUNIOR, W. C. P.; PEIXOTO, M. G. C. D.; PIRES, M. F. Á.; SANTANA JÚNIOR, M. L.; BRUNELI, F. A. T.; CARVALHO, G. R. Zoneamento dos efeitos do estresse

térmico em vacas leiteiras no Sudeste do Brasil. **Revista Contemporânea**, v. 3, n. 12, p. 29977-29991, 2023. DOI: <https://doi.org/10.56083/RCV3N12-263>.

AZEVEDO, D. M. M. R.; ALVES, A. A. **Bioclimatologia aplicada à produção de bovinos leiteiros nos trópicos**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2009.

AZEVEDO, M. de; PIRES, M. de F. Á.; SATURNINO, H. M. Estimativa de níveis críticos superiores do índice de temperatura e umidade para vacas leiteiras $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ e $\frac{7}{8}$ Holandês-Zebu em lactação. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 34, n. 6, p. 2000-2008, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982005000600025>.

BEGGS, D. S.; JONGMAN, E. C.; HEMSWORTH, P. H.; FISHER, A. D. The effects of herd size on the welfare of dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v. 102, n. 4, p. 3406-3420, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14850>.

BENTO, F. G.; LIMBERGER, T. F. C. S. O impacto do estresse térmico na produção de vacas leiteiras. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 11, n. 9, 2025.

BROOM, D. M. Welfare assessment and relevant ethical decisions. **ARBS Annual Review of Biomedical Sciences**, v. 10, p. T79-T90, 2008.

COSTA, M. J. R. P.; NOGUEIRA, S. S. C. Bem-estar animal. In: YAMAMOTO, M. E.; VOLPATO, G. L. (Org.). **Comportamento Animal**. Natal: EDUFRN, 2011. p. 371-388.

COSTA, M. P.; CEBALLOS, M. C. Benefícios econômicos e sociais relacionados ao bem-estar de bovinos. **Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín**, v. 74, p. 20-23, 2021.

CRIANDO CONEXÕES. **Os 5 domínios do bem-estar animal**. Disponível em: <https://www.criandoconexoes.com.br/os-5-dominios-do-bem-estar-animal/>. Acesso em: 25 nov. 2025.

DALTRO, A. M.; BETTENCOURT, A. F.; XIMENES, C. A. K.; SANTOS DALTRO, D.; SANTOS PINHO, A. P. Efeito do estresse térmico por calor na produção de vacas leiteiras. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 26, n. 1, p. 288-311, 2020. DOI: <https://doi.org/10.36812/pag.2020261288-311>.

DIAS-FILHO, M. B. **Degradação de pastagens: processos, causas e estratégias de recuperação**. 4. ed. Belém: MBDF, 2011.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Anuário leite 2025: produção de leite e as mudanças climáticas**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2025.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Aspectos econômicos na integração lavoura-pecuária-floresta**. Sinop, MT: Embrapa Agrossilvipastoril, 2013.

FABRIS, T. F.; LAPORTA, J.; SKIBIEL, A. L.; CORRÊA, F. N.; SENN, B. D.; WOHLGEMUTH, S. E.; DAHL, G. E. Effect of heat stress on dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, v. 102, n. 6, p. 5647-5656, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15721>.

FEBRAPDP. FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO E IRRIGAÇÃO. **Após 12 anos, pesquisa traz embasamento para plantio de árvores em sistemas ILPF**. Disponível em: <https://plantiodireto.org.br/apos-12-anos-pesquisa-traz-embasamento-para-plantio-de-arvores-em-sistemas-ilpf>. Acesso em: 24 mar. 2026.

FRANKE, I. L.; FURTADO, S. C. **Sistemas silvipastoris: fundamentos e aplicabilidade**. 2001. ISSN: 0104-9046. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/499861/1/doc74.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2024.

FRASER, D.; KHARB, R. M.; MCCRINDLE, C.; MENCH, J.; COSTA, M. P.; PROMCHAN, K.; SONG, W. **Capacitação para implementar boas práticas de bem-estar animal**. Relatório do Encontro de Especialistas da FAO, Roma: FAO, 2009. ISBN: 9789259061468.

GLOBO RURAL. **ILPF: variações possíveis e rentáveis**. Globo Rural, 2016. Disponível em: <https://globorural.globo.com/Integracao/noticia/2016/09/ilpf-variacoes-possiveis-e-rentaveis.html>. Acesso em: 24 mar. 2026.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa da pecuária municipal 2024**. 2024b Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ppm/quadros/brasil/2024>. Acesso em: 23 mar. 2026.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção de leite no Brasil**. 2024a. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/leite/br>. Acesso em: 23 mar. 2026.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da pecuária municipal 2004**. Rio de Janeiro: IBGE, 2005. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/84/ppm_2004_v32_br.pdf. Acesso em: 23 mar. 2026.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Ano de 2025 foi o sétimo mais quente no Brasil desde 1961**. 2026. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/ano-de-2025-foi-o-s%C3%A9timo-mais-quente-no-brasil-desde-1961>. Acesso em: 23 mar. 2026.

KAUFMAN, J. D.; SAXTON, A. M.; RÍUS, A. G. Short communication: relationships among temperature humidity index with rectal, udder surface, and vaginal temperatures in lactating dairy cows experiencing heat stress. **Journal of Dairy Science**, v. 101, n. 7, p. 6424-6429, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13799>.

KLUTHCOUSKI, J.; CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; SALTON, J. C.; MACEDO, M. C. M.; ZIMMER, A. H.; BALBINO, L. C.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; MÜLLER, M. D. **Conceitos e modalidades da estratégia de integração lavoura-pecuária-floresta**. [S.l.: s.n.], [2013].

KUMAR, G.; DEVI, P.; SHARMA, N.; SOMAGOND, Y. M. Impact of thermal stress on milk production, composition and fatty acid profile in dairy cows: a review. **Journal of Entomology and Zoology Studies**, v. 8, n. 5, p. 1278-1283, 2020.

MACHADO, L. A. Z.; BALBINO, L. C.; CECCON, G. **Integração lavoura-pecuária-floresta: 1. Estruturação dos sistemas de integração lavoura-pecuária**. Dourados, MS: Embrapa Agropecuária Oeste, 2011. 46 p. (Documentos, 110).

MALLMANN, V.; ARAGÃO, R. F. R.; PESTANA, V. J.; BARTIERES, E. M. M.; ARAGÃO, L. W. W. R. Sistemas agroflorestais e agroecologia: uma alternativa para recuperação de áreas degradadas. **Revista Online de Extensão e Cultura Realização**, v. 5, n. 9, p. 66-72, 2018. Disponível em: <http://ojs.ufgd.edu.br/index.php/realizacao/article/view/8577>. Acesso em: 23 mar. 2026.

MARTINS, C. F.; FONSECA-NETO, A. M.; BESSLER, H. C.; DODE, M. A. N.; LEME, L. O.; FRANCO, M. M.; MCMANUS, C. M.; MALAQUIAS, J. V.; FERREIRA, I. C. Natural shade from integrated crop–livestock–forestry mitigates environmental heat and increases the quantity and quality of oocytes and embryos produced in vitro by Gyr dairy cows. **Livestock Science**, p. 104341, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104341>.

MELLOR, D. J. Updating animal welfare thinking: moving beyond the “Five Freedoms” towards “A Life Worth Living”. **Animals**, v. 6, n. 3, p. 21, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani6030021>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-2615/6/3/21>. Acesso em: 23 mar. 2026.

MELLOR, D. J.; REID, C. S. W. Concepts of animal well-being and predicting the impact of procedures on experimental animals. In: **Improving the well-being of animals in the research environment**. Canberra: Australian Government Publishing Service, 1994. p. 3-18.

NASCIMENTO, P. O.; SOUZA, M. N. Integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e a recuperação de pastagens degradadas. In: SOUZA, M. N. (Org.). **Tópicos em recuperação de áreas degradadas**. Canoas: Mérida Publishers, 2022. v. 4, p. 152-171.

OIE. ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE ANIMAL. **Código Sanitário de Animais Terrestres**. Paris, 2015.

OLIVEIRA, C. H. R.; REIS, G. G.; REIS, M. das G. F. Integração lavoura-pecuária-floresta como estratégia de intensificação sustentável da produção agropecuária. **Revista Árvore**, v. 44, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/kMkF5trNSxWyRgXM3vRvKsj/>. Acesso em: 31 mar. 2026.

PACIULLO, D. S. C.; SILVA, V. D.; CARVALHO, M. M.; CASTRO, C. R. T.; PACIULLO, E. G. D. L.; CASTRO, E. G. D. Arranjos e modelos de sistemas silvipastoris. In: SÍMPOSIO INTERNACIONAL SISTEMAS AGROSILVIPASTORIS NA AMÉRICA DO SUL, 2. 2007, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2007. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/595577>. Acesso em: 12 jun. 2024.

PEREIRA, L. C. A.; MADELLA-OLIVEIRA, A. F. Bem-estar de bezerros durante o aleitamento e a desmama em diferentes sistemas de criação: revisão. **Pubvet**, v. 14, n. 8, p. 1-11, 2020. DOI: <https://doi.org/10.31533/pubvet.v14n8a628.1-11>.

PEZZOPANE, J. R. M.; NICODEMO, M. L. F.; CRISTIAM, B.; GARCIA, A. R.; LULU, J. Animal thermal comfort indexes in silvopastoral systems with different tree arrangements. **Journal of Thermal Biology**, v. 79, p. 103-111, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.12.015>.

PRAGNA, P.; ARCHANA, P. R.; ALEENA, J.; SEJIAN, V.; KRISHNAN, G.; BAGATH, M.; MANIMARAN, A.; BEENA, V.; KURIEN, E. K.; VARMA, G.; BHATTA, R. Heat stress and dairy cow: impact on both milk yield and composition. **International Journal of Dairy Science**, v. 12, n. 1, p. 1-11, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3923/ijds.2017.1.1>.

ROSSO, G. **Árvores no pasto melhoraram ganho de peso, conforto térmico e reprodução dos animais.** 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/87217390/arvores-no-pasto-melhoram-ganho-de-peso-conforto-termico-e-reproducao-dos-animais>. Acesso em: 18 jun. 2024.

SANTOS, B.; NEVES, A. Z.; RIBEIRO, L. F. Importância do bem-estar animal na bovinocultura de leite. **Revista GeTeC**, v. 10, n. 26, p. 126-133, 2021. Disponível em: <https://revistas.fucamp.edu.br/index.php/getec/article/view/2376>. Acesso em: 18 jun. 2024.

SANTOS, W. G.; LEÃO, C. R. A. **Influência do sombreamento na produtividade de vacas leiteiras no Brasil: revisão de literatura.** 2017. 31 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Pecuária Leiteira) – Instituto Federal de Minas Gerais, São João Evangelista, 2017.

SOUZA REIS, L.; MARQUES, L. R.; DOS SANTOS, S. N.; DO PRADO PAIM, T.; GUIMARÃES, T. P.; MARQUES, T. C.; LEÃO, K. M. Produção de leite em sistema silvipastoril: revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, p. 43, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i4.14043>.

SOUZA, M. N. (Org.). **Tópicos em recuperação de áreas degradadas.** Canoas: Mérida Publishers, 2022. 182 p. ISBN: 978-65-87595-50-1.

SUZUKI, R. **Estresse térmico em vacas leiteiras: um mal que se sente na pele.** Bebedouro, 2021. Disponível em: <https://www.portaldoagronegocio.com.br/pecuaria/bovinos-leite>. Acesso em: 16 maio 2024.

TAO, S. H. A.; RIVAS, R. M. O.; MARINS, T. N.; CHEN, Y. C.; GAO, J.; BERNARD, J. K. Impact of heat stress on lactational performance of dairy cows. **Theriogenology**, v. 150, p. 437-444, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.02.048>.

ZANIN, E.; BICHEL, A.; MANGILLI, L. G. Bem-estar de vacas leiteiras em sistema silvipastoril. **Pubvet**, v. 10, n. 5, p. 381-387, 2016. DOI: <https://doi.org/10.22256/pubvet.v10n5.381-387>.

CAPÍTULO 4

Integração de estratégias sustentáveis: Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e Sistemas Agroflorestais (SAFs) como alternativas ao enfrentamento da degradação ambiental

Jainny Juliany Mathias das Neves, Lessa Braz Lopes, Jodielli Santana de Andrade, Jozimara Teixeira de Souza, Fernanda Barcelos de Paula, Willian Moreira da Costa, Atanásio Alves do Amaral, Maurício Novaes Souza

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-45-9.c4>

Resumo

O meio ambiente pode ser compreendido como o conjunto de condições e interações que sustentam a vida na Terra, fornecendo recursos essenciais como água, oxigênio, nutrientes e habitats que abrigam a biodiversidade. Entretanto, a degradação ambiental, caracterizada pela deterioração dos recursos naturais, tem provocado desequilíbrios ecológicos decorrentes de ações antrópicas e processos naturais. Práticas como o manejo inadequado do solo, a emissão de poluentes e a exploração intensiva dos recursos contribuem para a degradação do ar, da água e do solo, além de intensificar as mudanças climáticas. Nesse contexto, o agronegócio, quando conduzido de forma não sustentável, pode agravar tais impactos, resultando em perda de biodiversidade, erosão e escassez hídrica. Por outro lado, a Agroecologia se apresenta como uma abordagem estratégica, ao promover práticas conservacionistas que favorecem a recuperação ambiental e o uso sustentável dos recursos naturais. Como instrumento de incentivo, destaca-se o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), política pública do Estado do Espírito Santo que remunera produtores pela adoção de práticas sustentáveis. O programa contempla modalidades conservacionistas e produtivas, incluindo Sistemas Agroflorestais (SAFs). Além disso, contribui para a redução do desmatamento, a mitigação da estiagem, o fortalecimento da segurança alimentar e a geração de renda para agricultores familiares.

Palavras-chave: Agroecologia. Conservação do solo. Serviços ecossistêmicos. Agricultura familiar. Segurança hídrica.

1. Introdução

O meio ambiente, conforme estabelecido pela Lei da Política Nacional do Meio Ambiente no Brasil, em seu artigo 3º, inciso I, refere-se ao “conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas” (Brasil, 1981). Trata-se de um sistema complexo e dinâmico, essencial para a manutenção da vida na Terra, ao fornecer recursos indispensáveis como ar, água, solo e uma ampla diversidade de habitats.

No entanto, a degradação ambiental representa a deterioração progressiva desse sistema, resultante, sobretudo, de perturbações associadas às atividades humanas insustentáveis. Entre essas, destacam-se a poluição, a exploração desordenada dos recursos naturais e as mudanças climáticas induzidas pela emissão de gases de efeito estufa, que têm provocado impactos significativos na integridade dos ecossistemas e na qualidade de vida das populações humanas e não humanas (Johnson, 1997; Souza, 2015; 2018; Krüger *et al.*, 2022; Shetty *et al.*, 2023) (Figura 1).



Figura 1. Principais indicadores da degradação agrícola e biológica. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

A intensificação das atividades agrícolas sem a devida consideração dos limites ecológicos configura-se como um dos principais vetores de degradação

ambiental na atualidade. A utilização excessiva de insumos químicos, a expansão de monoculturas e a supressão da vegetação nativa contribuem diretamente para a perda de biodiversidade, a erosão do solo e a degradação dos recursos hídricos (Souza *et al.*, 2025; Souza, 2025).

Tais práticas resultam no empobrecimento dos solos e na redução de sua capacidade produtiva ao longo do tempo (Macedo; Zimmer, 1993; Costa *et al.*, 2018). Além disso, esses impactos extrapolam o âmbito produtivo, afetando diretamente a saúde humana e comprometendo a qualidade ambiental das áreas rurais, evidenciando a necessidade de transição para modelos mais sustentáveis de produção (Souza *et al.*, 2021) (Figura 2).



Figura 2. Degradação ambiental: como um evento desencadeia uma série de impactos. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Sob essa ótica, a promoção de práticas agrícolas sustentáveis e a valorização da agroecologia assumem papel estratégico na mitigação da degradação ambiental dos agroecossistemas. A agroecologia emerge como uma abordagem integradora, que alia conhecimentos científicos e saberes tradicionais, promovendo sistemas produtivos mais resilientes, diversificados e ambientalmente equilibrados. Essa perspectiva contribui não apenas para a conservação dos recursos naturais, mas também para o fortalecimento das dimensões sociais e econômicas da agricultura, especialmente no âmbito da agricultura familiar (Souza, 2011; Souza *et al.*, 2021).

Diante desse cenário, destaca-se a importância dos serviços ambientais, entendidos como os benefícios gerados pelos ecossistemas que contribuem para o bem-estar humano. Esses serviços incluem a regulação do clima, a conservação da água, a manutenção da fertilidade do solo e a preservação da biodiversidade (Muradian *et al.*, 2010; Coelho *et al.*, 2021). Segundo Souza *et al.* (2021), a valorização desses serviços constitui um elemento fundamental para a construção de sistemas produtivos sustentáveis, ao reconhecer o papel dos agricultores como agentes ativos na conservação ambiental.

Nesse sentido, o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) tem se consolidado como um importante instrumento de política pública, amplamente adotado em diferentes países. Trata-se de um mecanismo econômico que visa incentivar práticas conservacionistas por meio da compensação financeira a produtores rurais e comunidades que contribuem para a manutenção ou recuperação dos serviços ecossistêmicos. Essa abordagem favorece a conservação da biodiversidade, a proteção dos recursos hídricos e a mitigação das mudanças climáticas (Coelho *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2021; Trugilho *et al.*, 2022; Vieira *et al.*, 2024). Paralelamente, a adoção de Sistemas Agroflorestais (SAFs) representa uma alternativa promissora para a integração entre produção agrícola e conservação ambiental (Figura 3).

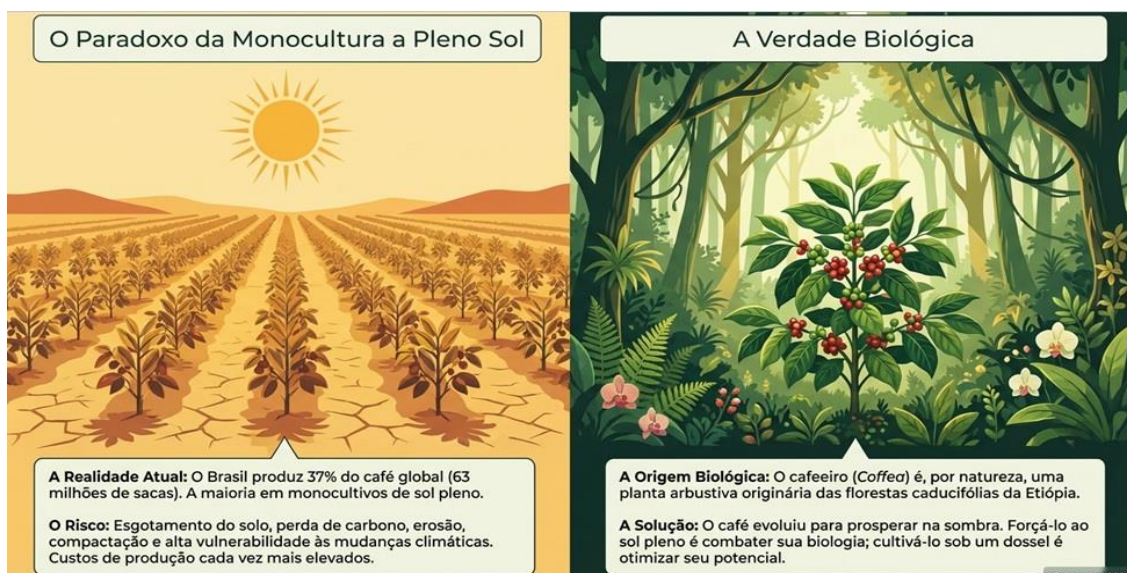


Figura 3. Sistemas agroflorestais e seus benefícios ecossistêmicos. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Esses sistemas caracterizam-se pela combinação intencional de espécies arbóreas com cultivos agrícolas e, ou, criação de animais, promovendo uma série de benefícios ecológicos e produtivos. Entre esses, destacam-se a melhoria da fertilidade do solo, a redução da erosão, o aumento da biodiversidade e o sequestro de carbono, além de maior estabilidade econômica para os agricultores (Wandelli; Ocidental, 2010; Steenbock *et al.*, 2013; Souza *et al.*, 2021).

Portanto, para mitigar os impactos da degradação ambiental ao longo das etapas de implantação, manejo e comercialização das culturas, torna-se fundamental que os órgãos públicos e instituições de apoio ampliem a divulgação dos serviços ambientais e incentivem o planejamento e a adoção de sistemas agroflorestais. Essas ações devem ser acompanhadas por instrumentos legais, políticas públicas eficazes e incentivos financeiros, promovendo condições adequadas para a transição agroecológica e o fortalecimento de modelos produtivos sustentáveis (Abdo; Valeri; Martins, 2008; Souza *et al.*, 2021).

2. Degradação ambiental: uma introdução às causas e consequências

A degradação ambiental refere-se ao conjunto de processos que comprometem a qualidade e a funcionalidade dos ecossistemas, reduzindo sua capacidade de sustentar a vida e de fornecer serviços ecossistêmicos essenciais à sociedade. Trata-se de um fenômeno multifacetado, resultante da interação entre fatores naturais e, sobretudo, das pressões antrópicas associadas a modelos de desenvolvimento insustentáveis (Odum, 1988; Souza, 2011; 2018).

Entre as principais causas desse processo, destacam-se o desmatamento, a expansão de monoculturas, o uso intensivo de agrotóxicos e fertilizantes químicos, a urbanização desordenada e a exploração excessiva dos recursos naturais (Figura 4). Tais práticas estão frequentemente vinculadas a uma lógica produtivista que prioriza ganhos econômicos de curto prazo em detrimento da conservação ambiental e do equilíbrio ecológico (Altieri, 2012; Gliessman, 2015; Souza, 2018; Souza *et al.*, 2021).

Como consequências, observam-se a perda da biodiversidade, a degradação física, química e biológica do solo, a escassez e contaminação dos

recursos hídricos, além do agravamento das mudanças climáticas globais. Esses impactos comprometem diretamente a segurança alimentar, a saúde humana e a qualidade de vida, afetando de maneira mais intensa as populações em situação de maior vulnerabilidade socioeconômica (FAO, 2019; IPCC, 2021).



Figura 4. Evolução das taxas anuais de desmatamento no Brasil entre 2019-2022. Fonte: Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Diante desse cenário, torna-se fundamental promover práticas sustentáveis que integrem produção e conservação ambiental. Nesse contexto, a agroecologia destaca-se como uma abordagem estratégica, ao propor sistemas produtivos baseados na diversidade, na ciclagem de nutrientes e no fortalecimento das interações ecológicas. Ao valorizar os saberes locais e reduzir a dependência de insumos externos, a agroecologia contribui para a resiliência dos agroecossistemas e para a construção de um modelo de desenvolvimento mais equilibrado, inclusivo e duradouro (Souza, 2011; Gliessman, 2015; Souza, 2018; Souza *et al.*, 2025b; Souza, 2025).

2.1. Degradação, impactos e externalidades ambientais

As transformações no meio ambiente acompanham a evolução do ser humano enquanto ser social, envolvendo a incorporação de novos meios,

tecnologias e técnicas, tanto na produção econômica quanto nos mecanismos voltados à melhoria do bem-estar social. Contudo, parte dessas transformações tem gerado impactos e externalidades negativos significativos, destacando-se, no debate sociopolítico contemporâneo, a problemática da degradação ambiental (Silva; Felizmino; Oliveira, 2015; Souza, 2018; Souza, 2025; Souza *et al.*, 2025b).

Nesse contexto, o conceito de áreas ou paisagens degradadas refere-se a espaços que sofreram processos de perturbação capazes de comprometer suas funções ecológicas, resultando na perda ou redução de propriedades essenciais, como a capacidade produtiva dos recursos naturais, envolvendo diretamente componentes bióticos e abióticos (Brasil, 1989; Almeida, 2016).

O processo de degradação ambiental pode ocorrer de diversas formas, sendo decorrente tanto de atividades antrópicas quanto de fatores naturais (Figura 5). Trata-se de um fenômeno complexo, associado a múltiplas causas que afetam diferentes regiões do mundo, promovendo a perda da biodiversidade e comprometendo a conservação e a manutenção dos ecossistemas (Lemos, 2001; Souza, 2015; Pereira Junior; Pereira, 2017; Souza, 2018).

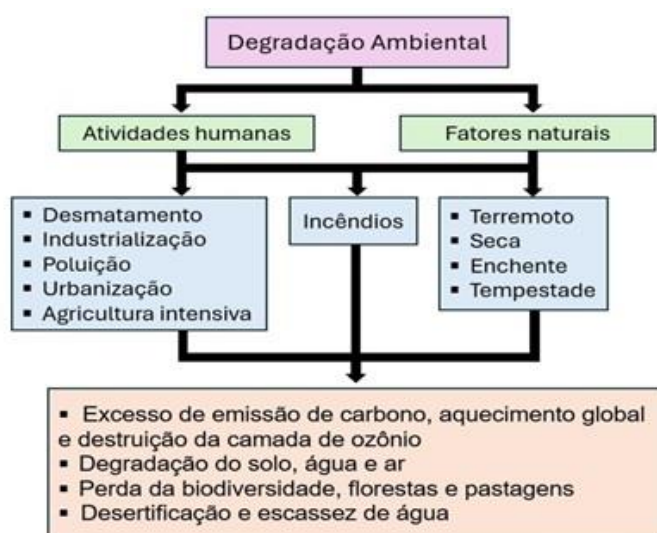


Figura 5. Visão geral dos principais vetores econômicos e sociais da degradação ambiental. Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

Entre as principais atividades que impulsionam esse processo, destacam-se o desmatamento excessivo, a urbanização desordenada, o manejo agrícola

intensivo e a queima de combustíveis fósseis no contexto da industrialização. Essas práticas resultam na emissão de gases de efeito estufa, contribuindo para o aquecimento global, a alteração dos padrões climáticos e a intensificação de eventos extremos, com impactos diretos sobre o equilíbrio dos ecossistemas e o bem-estar das populações humanas, tanto em áreas rurais quanto urbanas (Choudhary; Chauhan; Kushwah, 2015; Souza, 2015; 2018; 2025).

Diante desses incontestáveis impactos negativos sobre o meio ambiente, Layrargues (2002) destaca que o uso inadequado dos recursos naturais decorre, em grande medida, do desconhecimento acerca de seus efeitos colaterais, bem como da insuficiente aplicação do conhecimento ecológico nas atividades produtivas, o que resulta em prejuízos significativos ao equilíbrio ambiental.

Ademais, esse cenário é agravado pela lógica predominante em determinados setores do sistema produtivo, envolvendo organizações, instituições e corporações, que prioriza a maximização de ganhos econômicos no curto prazo, em detrimento da sustentabilidade dos recursos naturais (Figura 6).



Figura 6. Gráfico comparativo da velocidade de perda de cobertura vegetal nativa em diferentes biomas brasileiros (2019-2022). Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Tal perspectiva contribui para a intensificação da exploração ambiental e sustenta uma visão equivocada de que o patrimônio ambiental não deve ser

reconhecido como um bem coletivo, mas apropriado como um recurso de natureza individual, comprometendo, assim, os princípios de equidade e responsabilidade socioambiental (Couto; Silva, 2014; Souza, 2025).

2.2. Desmatamento e agricultura intensiva

A degradação ambiental tem se intensificado de maneira expressiva em todos os biomas brasileiros, com incremento aproximado de 20%, sendo o desmatamento apontado como o principal fator responsável por esse processo (Figura 7). Nesse contexto, o agronegócio destaca-se como o principal vetor dessa dinâmica, respondendo por cerca de 97% da supressão da vegetação nativa (MapBiomias, 2022).



Figura 7. Matriz da destruição no Brasil: 90,10% da perda de vegetação nativa concentrada em dois biomas (2019-2022). Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Assim, observa-se que grande parte das alterações ambientais verificadas no país está diretamente associada à expansão das atividades agropecuárias. No cenário brasileiro, essa problemática adquire contornos ainda mais complexos, uma vez que o setor agropecuário exerce papel estratégico na economia nacional, sendo responsável pela geração de emprego e renda, além

de contribuir significativamente para o Produto Interno Bruto (Pinto *et al.*, 2019; Souza, 2025; 2025a).

De acordo com o Relatório Anual de Desmatamento (RAD) do MapBiomas (2022), que reúne e sistematiza dados de todo o território nacional e de seus diferentes biomas, a área desmatada no Brasil apresentou um aumento de aproximadamente 22,3% no período analisado. Foram identificados, validados e refinados 76.193 alertas de desmatamento, totalizando cerca de 2.057.251 hectares. Considerando o intervalo entre 2019 e 2022, desde a implantação do RAD, foram registrados mais de 303 mil eventos de desmatamento, que somam aproximadamente 6,6 milhões de hectares: uma área equivalente a cerca de uma vez e meia o território do estado do Rio de Janeiro. Esses números evidenciam a magnitude e a persistência do problema no contexto nacional (Figura 8).

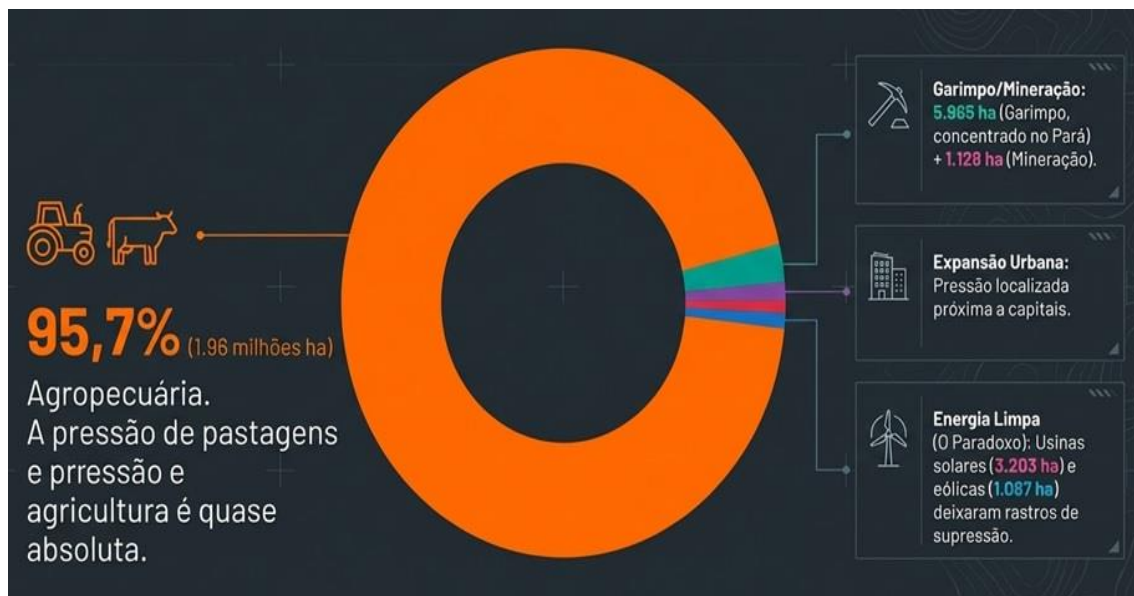


Figura 8. Distribuição dos principais vetores de pressão que impulsionam o desmatamento no Brasil. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Em contrapartida, dados mais recentes apontam para uma redução expressiva do desmatamento no estado do Espírito Santo, que registrou queda de aproximadamente 60% no ano de 2024 (MapBiomas, 2025). Esse resultado pode estar associado a mudanças graduais no comportamento produtivo, com

maior conscientização por parte dos produtores acerca dos impactos ambientais de suas práticas, bem como à ampliação e fortalecimento de políticas públicas voltadas à sustentabilidade, a exemplo do Pagamento por Serviços Ambientais (PSA).

No contexto capixaba, a agricultura foi identificada como o principal vetor do desmatamento, estando presente em 96,6% dos casos registrados (Figura 9). Em escala nacional, esse setor também apresenta forte influência, sendo responsável por aproximadamente 86,4% da supressão da vegetação no bioma Mata Atlântica (MapBiomas, 2022). Esses dados revelam que as regiões agrícolas do estado enfrentam desafios significativos relacionados à degradação ambiental, sobretudo em função do uso intensivo do solo para o cultivo de café, a formação de pastagens e outras atividades produtivas (Barreto; Sartori; Dadalto, 2012; Trugilho *et al.*, 2022; Vieira *et al.*, 2025).

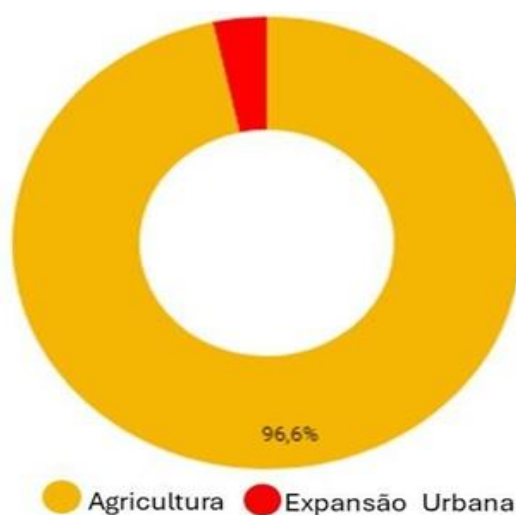


Figura 9. Participação da agropecuária e expansão urbana. Fonte: MapBiomas Alerta, 2022.

Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de promover uma transição para modelos produtivos mais sustentáveis, capazes de conciliar a produção agrícola com a conservação dos recursos naturais. Essa mudança de paradigma exige não apenas a adoção de práticas conservacionistas, mas também o fortalecimento de instrumentos econômicos e políticas públicas que incentivem a sustentabilidade no meio rural, como os Sistemas Agroflorestais (SAFs) e os programas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), os quais

se apresentam como alternativas viáveis para mitigar os impactos da degradação ambiental e promover maior equilíbrio entre produção e conservação.

O desmatamento associado às atividades agrícolas caracteriza-se, sobretudo, pela supressão da vegetação nativa, frequentemente realizada por meio da derrubada de florestas e da queima da biomassa, com o objetivo de viabilizar a abertura de novas áreas para a implantação de sistemas de monocultivo (Silva; Ribeiro, 2004; Souza, 2015; 2018; 2025). Esse processo, além de alterar profundamente a estrutura dos ecossistemas, compromete funções ecológicas essenciais, como a regulação climática, a conservação do solo e a manutenção da biodiversidade.

Em muitos casos, a atividade agropecuária é conduzida com base em técnicas altamente mecanizadas e intensivas que, embora aumentem a produtividade no curto prazo, tendem a gerar impactos negativos significativos sobre os recursos naturais. Dentre essas práticas, destacam-se o uso intensivo de fertilizantes químicos e agrotóxicos, que podem provocar contaminação do solo e da água, além de afetar organismos não-alvo e reduzir a qualidade ambiental dos agroecossistemas (Barros, 2009; Silva *et al.*, 2025; Souza, 2025).

De acordo com Deus e Bakonyi (2012), na agricultura intensiva, é comum a exploração quase total dos recursos naturais disponíveis na área de cultivo, com ênfase na maximização da produção em larga escala. Nesse modelo, observa-se, frequentemente, a ausência de planejamento ambiental adequado, bem como a baixa adoção de estratégias voltadas à recuperação de áreas degradadas e à recomposição da vegetação nativa, o que contribui para a continuidade dos processos de degradação ambiental (Figura 10).

Por outro lado, o Ministério do Meio Ambiente (2016) destaca que o Brasil tem demonstrado esforços no sentido de promover a sustentabilidade na produção agrícola. Entre as iniciativas, destacam-se o incentivo à agricultura familiar, às práticas extrativistas sustentáveis e aos sistemas de base orgânica e agroecológica, por meio da implantação de políticas públicas e programas específicos. No entanto, considerando a dimensão e a relevância do setor agropecuário no país, tais esforços ainda demandam ampliação e maior adesão

por parte dos produtores, de modo a consolidar uma transição efetiva para modelos produtivos mais sustentáveis (Figura 11).



Figura 10. A régua da ilegalidade no Brasil (2023): 99% das áreas desmatadas apresentam irregularidades. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

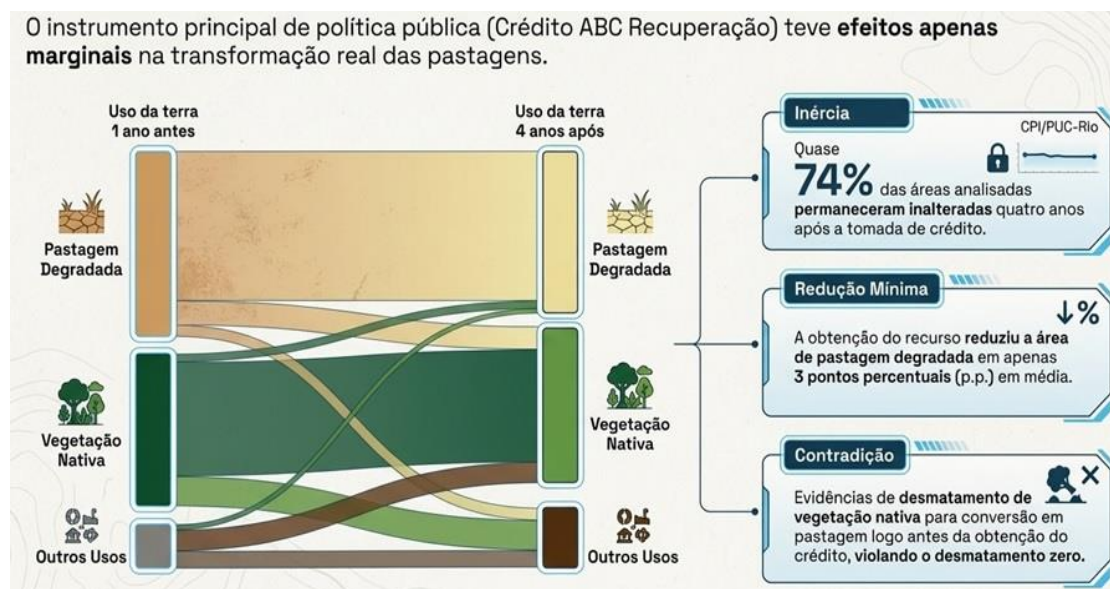


Figura 11. Comparação entre as metas de redução de emissões (expectativas) e as emissões reais (realidade) no Brasil em um período de 4 anos. (Crédito ABC). Fonte: Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

2.3. Degradação do solo

No contexto da degradação do solo, diversas consequências tornam-se evidentes, destacando-se a redução da produtividade das terras, o que resulta na diminuição da produção agrícola e no aumento dos custos de produção. Esse aumento está associado, sobretudo, à maior necessidade de utilização de insumos externos com o objetivo de restabelecer a fertilidade do solo. Como consequência, observa-se perda de competitividade no setor agropecuário, além da redução da atividade produtiva, em função da menor disponibilidade de áreas férteis para a criação de rebanhos e o cultivo de lavouras. Esse cenário repercute diretamente na economia, promovendo retração nos níveis de renda e emprego, e agravando as condições de vida da população (Sampaio; Araújo; Sampaio, 2005; Bernardi, 2025; Souza, 2025).

Esses problemas decorrem de uma combinação de fatores que contribuem para o processo de degradação do solo em diferentes regiões do mundo. Entre os principais, destacam-se a intervenção antrópica intensiva, o crescimento populacional e a adoção de práticas inadequadas na agropecuária (Balsan, 2006; Souza, 2015; 2018) (Figura 12).

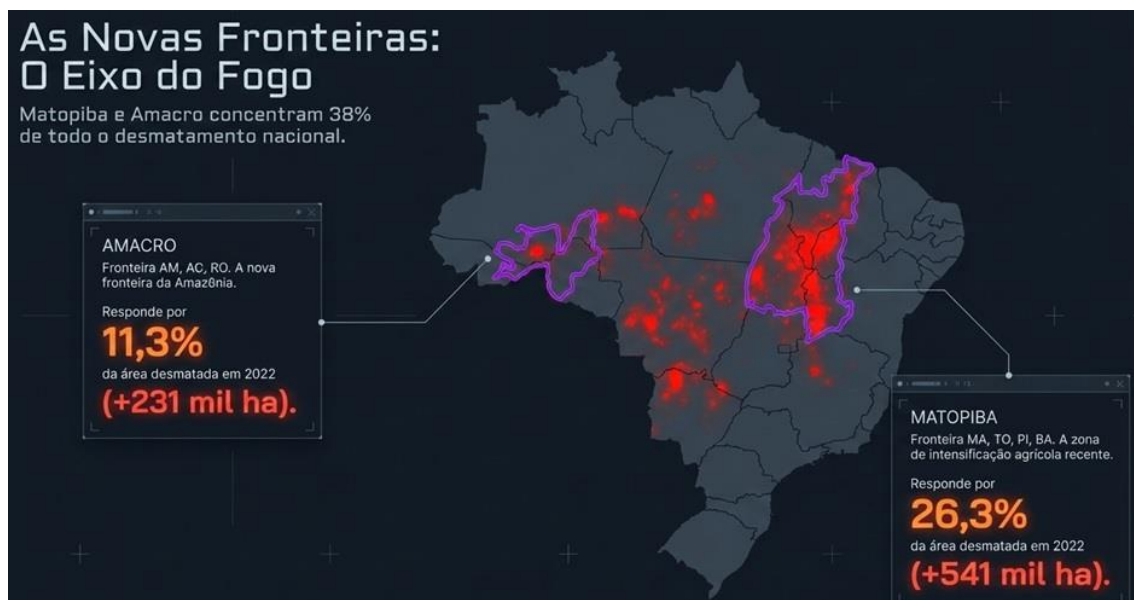


Figura 12. Expansão da fronteira agrícola no Brasil e sua correlação com o aumento de queimadas. Fonte: Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Nesse sentido, determinadas práticas e técnicas agrícolas exercem papel significativo na intensificação desses impactos, como o empobrecimento progressivo do solo, o uso excessivo de fertilizantes químicos e agrotóxicos, a irrigação inadequada e, em alguns casos, intervenções tecnológicas que desconsideram os limites ecológicos dos sistemas produtivos. Além disso, certos fertilizantes podem alterar a composição nutricional dos produtos vegetais, evidenciando que os impactos da degradação extrapolam o solo e alcançam a qualidade dos alimentos (Gliessman, 2005; Domingues, 2024; Souza, 2025).

No estado do Espírito Santo, a degradação do solo em áreas agrícolas concentra-se, principalmente, nas atividades de pastagem e no cultivo de café, com maior incidência na região Noroeste. Essa condição está associada à fragilidade natural dos solos, à elevada erosividade das chuvas e à baixa cobertura vegetal. Estima-se que cerca de 238 mil hectares de pastagens e 118 mil hectares de cafezais apresentem algum grau de degradação (Laborsolo, 2016) (Figura 13).



Figura 13. Pastagem em avançado estágio de degradação. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Tais impactos geram consequências expressivas não apenas para os produtores rurais, mas também para o setor público e para a sociedade como um todo, incluindo a redução da produtividade do solo, o assoreamento de

curtos d'água, alterações no regime hidrológico, aumento da frequência de eventos extremos, como secas e enchentes, além da poluição física da água e danos à infraestrutura pública.

A intensificação das atividades agrícolas está diretamente relacionada ao agravamento da degradação do solo, especialmente quando associada a sistemas de exploração baseados no monocultivo. A ausência de cobertura vegetal adequada expõe o solo a processos erosivos, além de favorecer sua compactação, comprometendo sua estrutura e funcionalidade (Costa *et al.*, 2018). Em estágios mais avançados de degradação, observa-se a perda de nutrientes essenciais, a redução da matéria orgânica, o deslocamento de partículas do solo e o carreamento de resíduos sólidos e insumos químicos para fora das áreas de cultivo. Esses processos resultam na diminuição da eficiência produtiva e no comprometimento da sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Ferreira *et al.*, 2016; Souza, 2025a).

2.4. Degradação das pastagens

No Brasil, a degradação de pastagens configura-se como um problema amplamente disseminado, estando, em grande parte, associada ao manejo inadequado e à utilização ineficiente de tecnologias, assistência técnica e insumos produtivos, especialmente em sistemas nos quais a pecuária não é conduzida sob bases técnicas e gerenciais consolidadas (Figura 14). Essa condição resulta em significativa subutilização do potencial produtivo das pastagens, caracterizando-se por um processo contínuo de redução da capacidade de suporte e da produtividade ao longo do tempo (Dias-Filho, 2017).

Esse processo de degradação manifesta-se por meio de diferentes indicadores, como a diminuição da cobertura vegetal, o aumento da presença de plantas invasoras, a compactação do solo e a redução da fertilidade. Tais fatores comprometem não apenas o desenvolvimento vegetativo das forrageiras, mas também o desempenho zootécnico dos animais, afetando diretamente os índices produtivos da pecuária. Como consequência, há necessidade crescente de abertura de novas áreas para manter os níveis de produção, o que contribui para

a expansão do desmatamento e intensifica os impactos ambientais (Souza, 2015; 2018).



Figura 14. Evidências visuais de degradação do solo em área de pastagem, como solo exposto e sinais de erosão laminar e ravinamento. Fonte: Acervo Maurício Novaes, 2024.

Além disso, a degradação das pastagens está frequentemente associada à ausência de práticas de manejo sustentável, como a adubação equilibrada, o controle da taxa de lotação e a adoção de sistemas de rotação de pastagens (Figura 15). A falta dessas estratégias acelera o esgotamento dos recursos naturais e compromete a resiliência dos sistemas produtivos frente às variações climáticas. Nesse contexto, torna-se fundamental a adoção de práticas conservacionistas e tecnologias adaptadas às condições locais, capazes de promover a recuperação das áreas degradadas e aumentar a eficiência produtiva de forma sustentável (Souza, 2025a).

Essa extensa área de pastagens, frequentemente conduzida sob sistemas monoculturais em solos de baixa fertilidade e submetida a manejo inadequado, representa um fator de risco significativo para a sustentabilidade da pecuária, em razão da elevada suscetibilidade ao processo de degradação. A degradação das pastagens configura-se, desde os anos da década de 1990, como um dos principais desafios à produção animal, caracterizando-se como um processo

dinâmico de deterioração gradual, marcado pela redução contínua da produtividade ao longo do tempo (Macedo; Zimmer, 1993; Zimmer *et al.*, 2012).

Nível 1 (Leve)	Status: Pastagem ainda produtiva. Sintomas: Pequenas áreas descobertas, rebrota lenta. Queda de Suporte: ~20%
Nível 2 (Moderado)	Status: Em degradação acelerada. Sintomas: Aumento da infestação de daninhas. Queda de Suporte: 30% a 50%
Nível 3 (Forte)	Status: Degradação Agrícola consolidada. Sintomas: Aumento excessivo de invasoras, proporção de forrageira muito baixa. Queda de Suporte: 60% a 80%
Nível 4 (Muito Forte)	Status: Degradação Biológica. Sintomas: Predominância de solo descoberto, sinais evidentes de erosão. Queda de Suporte: Acima de 80%

Figura 15. Matriz de diagnóstico estruturada para classificar os 4 níveis da degradação do solo. Fonte: Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

No sistema de produção de bovinos a pasto, o planejamento e o controle adequado da oferta de forragem são fundamentais para assegurar a eficiência produtiva, maximizar o desempenho animal e reduzir riscos associados à variabilidade ambiental. Nesse sentido, estratégias como o manejo racional das pastagens, incluindo o ajuste da taxa de lotação e a adoção de sistemas de pastejo rotacionado, associadas à suplementação alimentar, constituem ferramentas essenciais para o planejamento e a sustentabilidade dos sistemas produtivos (Pereira *et al.*, 2008; Souza, 2015; 2018).

A ausência de um planejamento racional do uso da terra, seja em decorrência de limitações técnicas, falta de assistência especializada ou das próprias condições socioeconômicas dos produtores, tem favorecido a intensificação de impactos negativos sobre os ecossistemas. Em muitos casos, esses impactos atingem níveis críticos, comprometendo a capacidade produtiva das áreas e promovendo processos de degradação ambiental (Figura 16). Como consequência, observa-se a redução da qualidade de vida, afetando não apenas

as populações rurais, mas também a sociedade de forma mais ampla (Saboya *et al.*, 2008; Souza, 2015).

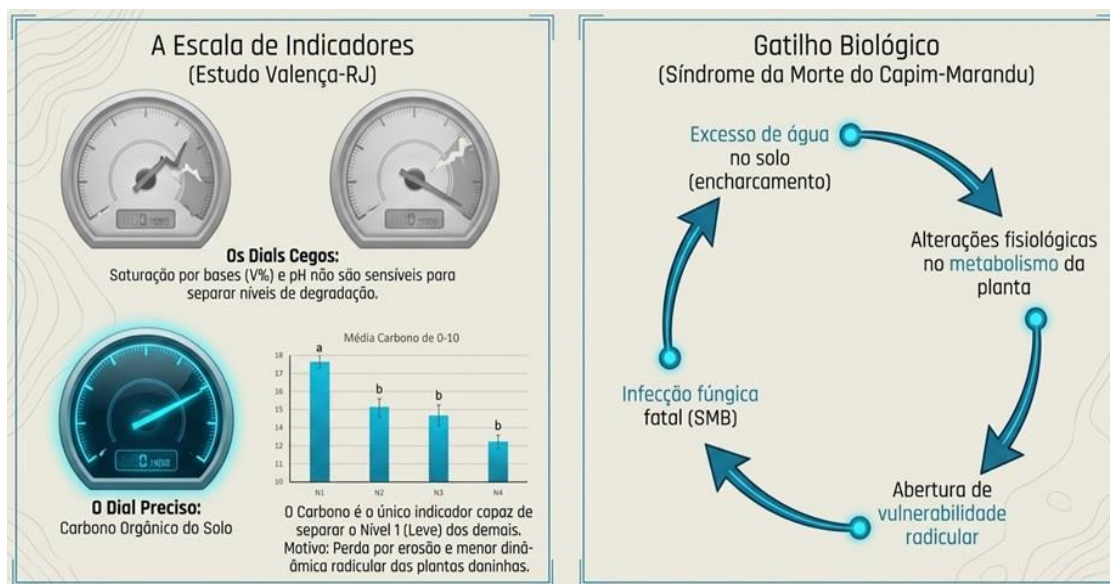


Figura 16. Inteligência subterrânea: diagrama dos principais indicadores e gatilhos que impulsionam a degradação do solo. Fonte: Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

2.5. Poluição da água

O Brasil detém aproximadamente 12% da disponibilidade mundial de água doce, configurando-se como uma das maiores reservas hídricas do planeta. No entanto, esses recursos encontram-se distribuídos de forma desigual ao longo do território nacional, que se estende de 5°N a 34°S de latitude, sendo sua disponibilidade fortemente influenciada por fatores climáticos e hidrológicos (Tundisi, 2014).

Apesar dessa expressiva disponibilidade, a degradação e o uso indiscriminado dos recursos hídricos têm se intensificado, tornando-se uma preocupação crescente na sociedade contemporânea. A água, elemento essencial à manutenção da vida, desempenha papel fundamental em diversas atividades econômicas, incluindo o abastecimento humano, a produção agrícola e a geração de energia. Ainda assim, observa-se que esses recursos não recebem o nível de proteção compatível com sua importância, sendo

frequentemente submetidos ao desperdício, à contaminação e à poluição das fontes de água potável (Xavier; Medeiros, 2017; Souza, 2025a).

No contexto agropecuário, a poluição hídrica está fortemente associada ao carreamento de resíduos provenientes das atividades produtivas. Insumos como fertilizantes e defensivos agrícolas, quando utilizados de forma intensiva e sem manejo adequado, podem ser transportados pela água da chuva para rios, lagos e aquíferos. Esse processo resulta em alterações significativas nas características físico-químicas da água, como coloração, turbidez, temperatura e parâmetros como pH e pressão osmótica, comprometendo a qualidade dos ecossistemas aquáticos e tornando a água imprópria para múltiplos usos (Silveira; Sant'Anna, 1990; Braga; Lima, 2014; Souza, 2025).

No âmbito institucional, destaca-se a Lei nº 10.179, de 6 de fevereiro de 2014, que estabelece a Política Estadual de Recursos Hídricos do Espírito Santo e institui o Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SIGERH/ES). Essa legislação tem como objetivos promover o uso sustentável da água, regulamentar a outorga de direitos de uso, implantar instrumentos econômicos, como a cobrança pelo uso dos recursos hídricos, e incentivar a participação social por meio dos Comitês de Bacias Hidrográficas. Além disso, a lei reforça a necessidade de preservação dos corpos d'água, recuperação de áreas degradadas, educação ambiental e monitoramento contínuo, visando à manutenção da qualidade e da disponibilidade hídrica (Brasil, 2014).

Diante desse cenário, a exploração intensiva e desordenada dos recursos naturais, associada às atividades agropecuárias e ao desenvolvimento tecnológico, tem gerado volumes crescentes de resíduos que impactam diretamente os corpos hídricos. Esses impactos promovem desequilíbrios ecológicos, comprometendo estruturas fundamentais para a manutenção da biodiversidade, como *habitats* e nichos ecológicos, além de afetar a qualidade de vida das populações humanas (Júnior; Pereira, 2017; Souza, 2018; 2025).

Nesse contexto, torna-se imprescindível a adoção de estratégias eficazes de mitigação, capazes de reduzir ou neutralizar os impactos negativos das atividades antrópicas sobre os recursos hídricos. Tais estratégias devem estar fundamentadas em princípios de sustentabilidade, promovendo o uso racional

da água, a conservação dos ecossistemas e a integração entre produção e proteção ambiental (Maurya *et al.*, 2020; Hasnat *et al.*, 2022) (Figura 17).



Figura 17. Análise temporal da recuperação de áreas de pastagem: evolução de indicadores de solo após aplicação do arsenal de intervenção. Fonte: Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Diante do conjunto de evidências apresentadas, que incluem a degradação do solo, das pastagens e dos recursos hídricos, torna-se evidente que os modelos convencionais de uso da terra, baseados na exploração intensiva e pouco planejada dos recursos naturais, têm contribuído significativamente para o desequilíbrio dos agroecossistemas. Esse cenário reforça a necessidade de transição para abordagens mais integradas e sustentáveis, capazes de conciliar produção agrícola, conservação ambiental e bem-estar social (Souza *et al.*, 2025b).

Nesse sentido, destacam-se os instrumentos econômicos e ecológicos que incentivam práticas conservacionistas, como o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e os Sistemas Agroflorestais (SAFs) (Figura 18). O PSA atua como mecanismo de valorização dos serviços ecossistêmicos, promovendo a compensação financeira a produtores que adotam práticas sustentáveis, especialmente aquelas voltadas à conservação da água, do solo e da biodiversidade (Trugilho *et al.*, 2022; Vieira *et al.*, 2025).

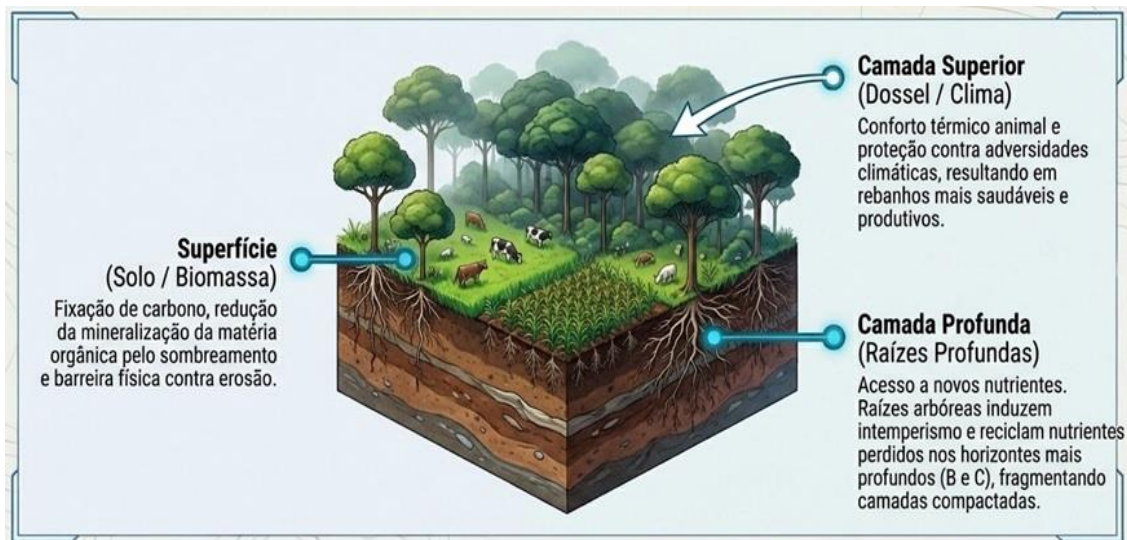


Figura 18. Estratificação vertical e ocupação de nichos em Sistemas Agroflorestais. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Por sua vez, os SAFs configuram-se como uma estratégia produtiva baseada na diversificação e na integração de espécies, contribuindo diretamente para a recuperação de áreas degradadas, a melhoria da qualidade do solo e a proteção dos recursos hídricos. A adoção desses sistemas favorece a ciclagem de nutrientes, a redução da erosão e o aumento da infiltração de água no solo, promovendo maior resiliência dos agroecossistemas frente às mudanças climáticas (Trugilho *et al.*, 2022; Vieira *et al.*, 2025).

Dessa forma, a integração entre PSA e SAFs representa uma abordagem promissora para enfrentar os desafios da degradação ambiental, ao alinhar incentivos econômicos com práticas produtivas sustentáveis. Essa sinergia possibilita não apenas a mitigação dos impactos ambientais, mas também a promoção do desenvolvimento rural sustentável, especialmente no contexto da agricultura familiar, contribuindo para a construção de sistemas produtivos mais equilibrados, resilientes e socialmente justos.

3. Pagamento por Serviços Ambientais (PSA)

O Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) configura-se como um instrumento de natureza econômica voltado ao incentivo financeiro a

proprietários e possuidores de terras que adotam práticas sustentáveis capazes de conservar, recuperar ou melhorar os serviços ecossistêmicos. Trata-se de um mecanismo que reconhece o papel dos produtores rurais como agentes fundamentais na manutenção dos recursos naturais, promovendo a internalização dos benefícios ambientais gerados por suas práticas (Wunder, 2005; Muradian *et al.*, 2010; Trugilho *et al.*, 2022; Vieira *et al.*, 2025).

No ordenamento jurídico brasileiro, o PSA encontra respaldo na Lei nº 12.651/2012 (Novo Código Florestal), que prevê a valorização dos serviços ambientais associados à conservação e ao uso sustentável dos ecossistemas. Entre os serviços contemplados, destacam-se: o sequestro e a manutenção de estoques de carbono, a conservação da biodiversidade, a proteção dos recursos hídricos, a regulação do clima, a valorização da beleza cênica, a preservação do conhecimento tradicional, bem como a conservação e melhoria da qualidade do solo. Ademais, o PSA também se relaciona diretamente à manutenção de Áreas de Preservação Permanente (APPs), Reservas Legais e áreas de uso restrito (BRASIL, 2012).

Posteriormente, a Lei nº 14.119/2021 instituiu a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais, consolidando esse instrumento no país e estabelecendo diretrizes para sua implantação. Essa legislação define o PSA como uma transação voluntária, na qual um ou mais provedores de serviços ambientais são remunerados por beneficiários, mediante a comprovação da provisão desses serviços, reforçando a importância de mecanismos de monitoramento e avaliação (BRASIL, 2021).

Cabe destacar que os objetivos do PSA estão diretamente alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) na Agenda 2030. Em especial, o PSA contribui para o alcance do ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima) e do ODS 15 (Vida terrestre), ao promover práticas que reduzem emissões de gases de efeito estufa, conservam ecossistemas terrestres e recuperam áreas degradadas (ONU, 2015). Além disso, pode contribuir indiretamente para outros objetivos, como o ODS 6 (Água potável e saneamento) e o ODS 2 (Fome zero e agricultura sustentável) (Figura 19).



Figura 19. Infográfico sobre SAFs no Brasil (2024) e sua relação com os ODS: impacto direto nos objetivos 13 (Ação Climática) e 15 (Vida Terrestre); indireto nos objetivos 2 (Fome Zero) e 6 (Água Limpa). Fonte: <https://ecofaq.com.br/o-que-sao-os-ods/>, 2024.

No contexto brasileiro, diversas iniciativas de PSA têm demonstrado resultados positivos tanto do ponto de vista ambiental quanto socioeconômico. Um exemplo relevante é o Programa Produtor de Água (PPA), coordenado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), que incentiva produtores rurais a adotarem práticas conservacionistas voltadas à proteção de mananciais, à melhoria da qualidade da água e à recuperação de áreas degradadas. Nesse programa, os pagamentos estão condicionados à implantação de ações como cercamento de nascentes, recomposição de matas ciliares e adoção de práticas de conservação do solo e da água (ANA, 2012).

Estudos indicam que o PSA também exerce um importante papel motivacional, ao promover o engajamento dos produtores em ações coletivas voltadas à conservação ambiental. Nesse sentido, Benicá e Clemente (2021) destacam que os agricultores percebem o PSA não apenas como uma fonte de renda complementar, mas também como um reconhecimento social de sua contribuição para a preservação dos recursos naturais. Essa valorização tende

a fortalecer o compromisso com práticas sustentáveis e a ampliar a adoção de tecnologias conservacionistas no meio rural (Figura 20).



Figura 20. PSA como fonte de renda e reconhecimento social pela preservação. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (Gemini.google.com).

Entretanto, apesar dos avanços, a efetividade dos programas de PSA ainda enfrenta desafios, como a necessidade de ampliação da escala de implantação, o aperfeiçoamento dos mecanismos de monitoramento e a garantia de continuidade dos incentivos financeiros. Além disso, é fundamental que esses programas sejam articulados a outras estratégias de desenvolvimento rural sustentável, como a agroecologia e os Sistemas Agroflorestais (SAFs), de modo a potencializar seus impactos positivos e promover uma transição mais ampla nos sistemas produtivos (Engel; Pagiola; Wunder, 2008; Coelho *et al.*, 2021; Vieira *et al.*, 2025).

4. Programa Reflorestar

O Programa Reflorestar, desenvolvido pelo Governo do Estado do Espírito Santo, configura-se como uma política pública inovadora voltada à recuperação da vegetação nativa e à conservação dos recursos hídricos, fundamentada no

mecanismo de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA). A iniciativa tem como principal objetivo incentivar produtores rurais a adotarem práticas sustentáveis, como a restauração florestal, a implantação de Sistemas Agroflorestais (SAFs) e a conservação de áreas naturais, promovendo a integração entre produção agrícola e sustentabilidade ambiental (Trugilho *et al.*, 2022; Vieira *et al.*, 2025).

Ao estimular a recomposição da cobertura vegetal e a proteção de nascentes e cursos d'água, o programa contribui significativamente para a melhoria da qualidade do solo, da água e da biodiversidade. Além disso, promove a geração de renda no meio rural e fortalece o protagonismo dos agricultores na construção de paisagens mais resilientes, evidenciando o papel estratégico da agricultura familiar na conservação dos recursos naturais.

4.1. O que é o Reflorestar?

O Programa Reflorestar foi instituído no estado do Espírito Santo por meio da Lei nº 9.864/2012, regulamentada pelo Decreto nº 3.182-R/2012, que estabelece diretrizes para a implantação do Pagamento por Serviços Ambientais (PSA). Seu objetivo central é ampliar a cobertura florestal no estado, incentivando produtores rurais a adotarem práticas de conservação e recuperação ambiental, mediante compensação financeira pelos serviços ecossistêmicos prestados.

Nesse contexto, o programa reconhece o papel do produtor rural como agente fundamental na conservação ambiental, promovendo uma lógica de incentivo econômico que valoriza práticas sustentáveis e contribui para a mitigação dos impactos ambientais decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais.

❖ Modalidades Conservacionistas

O Programa Reflorestar contempla diferentes modalidades, dentre as quais se destacam as de caráter conservacionista:

✓ Floresta em Pé:

Destinada a propriedades que já possuem áreas com cobertura florestal nativa em estágio inicial ou mais avançado de regeneração. Nessas áreas, o

programa incentiva a manutenção da vegetação existente por meio de pagamentos diretos aos proprietários, caracterizando-se como PSA de longo prazo. Essa modalidade busca evitar a supressão da vegetação e garantir a continuidade dos serviços ecossistêmicos prestados.

○ **Regras:**

- A formação florestal nativa deve apresentar, no mínimo, estágio inicial de regeneração, conforme mapeamentos de uso do solo realizados no Estado do Espírito Santo (2007-2008);
- Podem ser incluídos sistemas agroflorestais com, no mínimo, 10 espécies nativas, incluindo formações do tipo cabruca;
- Área máxima elegível de até 10 hectares.

✓ **Regeneração Natural:**

Consiste no isolamento de áreas degradadas e na eliminação dos fatores que impedem a regeneração, permitindo que a vegetação se recupere de forma natural. Essa abordagem prioriza a restauração ecológica com menor intervenção direta, aproveitando o potencial regenerativo do ecossistema (Figuras 21 e 22).

○ **Regras:**

- A área não deve se caracterizar como formação florestal natural consolidada;
- Não pode ter sido suprimida de forma irregular ou estar sob obrigação legal de recuperação;
- Deve ser destinada a uso alternativo previamente;
- Deve estar localizado em zonas com médio a alto potencial de regeneração natural;
- Área máxima elegível de até 10 hectares.



Figuras 21 e 22. Área de regeneração natural. Fonte: MV gestão integrada, 2024.

✓ **Recuperação com Plantio:**

Essa modalidade consiste na restauração de áreas degradadas, ou com baixo nível de regeneração natural, por meio do plantio de mudas de espécies nativas do bioma Mata Atlântica, com o objetivo de restabelecer as funções ecológicas do ecossistema local. Trata-se de uma estratégia ativa de restauração, que busca acelerar o processo de recomposição da cobertura vegetal, promovendo a recuperação da biodiversidade, da estrutura do solo e dos serviços ecossistêmicos associados. A área máxima elegível nessa modalidade é de até 6 hectares (Figura 23).

○ **Regras:**

- A restauração por meio do plantio de essências nativas deve ser realizada com espécies do bioma Mata Atlântica, garantindo uma diversidade mínima de 10 espécies, exceto em situações em que haja justificativa técnica para a utilização de menor diversidade, como em casos de limitações edafoclimáticas;
- A distribuição dos indivíduos por espécie deve buscar a maior equitatividade possível, de modo a favorecer a diversidade estrutural e funcional do ecossistema;
- Na elaboração do projeto técnico, não é permitida a recomendação do uso de herbicidas em Áreas de Preservação Permanente (APPs), em consonância com os princípios de conservação e proteção desses ambientes sensíveis.



Figura 23. Ação de plantio de mudas nativas para recuperação de área degradada. Fonte: MV gestão integrada, 2024.

❖ Modalidades Produtivas

✓ Floresta Manejada:

Essa modalidade consiste no manejo sustentável de formações florestais, envolvendo árvores e palmeiras com potencial para exploração de produtos madeireiros e não madeireiros, sem a realização de corte raso. O manejo é conduzido de forma planejada, com definição de ciclos de corte, técnicas de baixo impacto e práticas que assegurem a regeneração natural da área, garantindo a manutenção dos serviços ecossistêmicos ao longo do tempo. Trata-se, portanto, de uma estratégia que concilia produção econômica com conservação ambiental. A área máxima elegível é de até 2 hectares.

✓ Sistemas Agroflorestais (SAFs):

Os Sistemas Agroflorestais caracterizam-se pela integração, em uma mesma unidade de manejo, de espécies lenhosas perenes, como árvores, arbustos e palmeiras, com culturas agrícolas, a exemplo de café, milho e mandioca. Esses sistemas promovem simultaneamente a produção de alimentos e a conservação dos recursos naturais, sendo amplamente reconhecidos como estratégia sustentável de uso da terra (Figura 24).



Figura 24. Análise comparativa da produtividade e diversidade em sistemas de monocultura *versus* SAFs em processo de transição. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Além de favorecerem a diversificação produtiva e a distribuição da renda ao longo do ano, os SAFs contribuem para a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, a proteção dos recursos hídricos e a conservação da biodiversidade, especialmente em microbacias hidrográficas. A área máxima elegível nessa modalidade é de até 4 hectares.

○ **Regras:**

- O arranjo do SAF deve contemplar espécies distribuídas em, pelo menos, três estratos arbóreos, garantindo diversidade estrutural e funcional do sistema (Figuras 25 e 26):
 - **Extrato alto:** espécies com altura superior a 15 metros;
 - **Extrato médio:** espécies com altura entre 5 e 15 metros;
 - **Extrato baixo:** espécies com altura de até 5 metros;
- O extrato dominante não deve ultrapassar 60% da composição do sistema, evitando a predominância excessiva de uma única espécie ou grupo funcional;

- As espécies nativas devem representar, no mínimo, 10% da composição total, contribuindo para a conservação da biodiversidade e a manutenção das funções ecológicas locais.



Figuras 25 e 26. SAF de Café X Pupunha X Nativas (60% X 30% X 10%): campos mostrando a estrutura vertical e horizontal do sistema. Fonte: MV gestão integrada, 2024.

✓ **Sistemas Silvipastoris (SSPs):**

Os Sistemas Silvipastoris consistem na integração permanente, em uma mesma unidade de manejo, de espécies arbóreas com pastagens destinadas à produção animal. Trata-se de um sistema multifuncional que combina produção pecuária com conservação ambiental, promovendo benefícios ecológicos e produtivos simultaneamente.

Do ponto de vista ambiental, os SSPs contribuem para a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, a proteção dos recursos hídricos e a conservação das microbacias hidrográficas. Além disso, a presença de árvores favorece a regulação microclimática, reduzindo o estresse térmico e melhorando o bem-estar animal, o que pode refletir positivamente no desempenho produtivo dos rebanhos.

Sob a perspectiva econômica, esses sistemas possibilitam a diversificação da produção, com a obtenção de produtos madeireiros e não madeireiros, além da pecuária, aumentando a resiliência e a sustentabilidade dos sistemas

produtivos. A área máxima elegível para essa modalidade é de até 10 hectares (Figura 27).

○ **Regras:**

- Os arranjos de sistemas silvipastoris devem ser planejados de forma a incluir, no mínimo, 300 indivíduos arbóreos por hectare, garantindo densidade adequada para o desempenho das funções ecológicas e produtivas;
- Pelo menos 40% dos indivíduos arbóreos propostos por hectare devem ser constituídos por espécies não madeireiras, promovendo maior diversidade funcional e ampliando os serviços ecossistêmicos associados ao sistema.



Figura 27. Distribuição espacial de árvores nativas em área de pastagem, caracterizando um sistema silvipastoril. Fonte: Acervo dos autores, 2024.

No âmbito mais recente do Programa Reflorestar, foram autorizadas ações complementares voltadas à conservação hídrica e ao saneamento rural, incluindo a construção, manutenção e instalação de estruturas como barraginhas, coxinhos e caixas secas, além do apoio à implantação de fossas sépticas em propriedades rurais participantes. Essas práticas têm como objetivo principal ampliar a retenção de águas pluviais, aumentar a infiltração hídrica no

solo e reduzir processos erosivos, contribuindo para a recarga de aquíferos e a conservação das microbacias hidrográficas.

Adicionalmente, o incentivo à instalação de fossas sépticas representa um avanço significativo no enfrentamento da poluição difusa no meio rural, promovendo a redução da contaminação do solo e dos recursos hídricos por efluentes domésticos. Essas ações refletem uma abordagem integrada de gestão ambiental, na qual práticas conservacionistas e de saneamento básico são articuladas para promover a melhoria da qualidade ambiental e das condições de vida das populações rurais (ANA, 2021; ESPÍRITO SANTO, 2024).

Nesse contexto, o Programa Reflorestar reforça seu papel como instrumento de valorização dos serviços ecossistêmicos, ao remunerar produtores rurais que adotam práticas voltadas à conservação ambiental e ao uso sustentável dos recursos naturais. Tal estratégia contribui não apenas para a proteção dos ecossistemas, mas também para o fortalecimento da governança ambiental e para a promoção do desenvolvimento rural sustentável.

No que se refere aos instrumentos legais e financeiros, a Lei nº 10.583/2016 regulamenta a operacionalização do Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) no estado do Espírito Santo, estabelecendo diferentes formas de incentivo aos produtores. O pagamento pode ocorrer tanto por meio de compensação financeira direta quanto por apoio financeiro destinado à aquisição de insumos, à estruturação de projetos técnicos e ao monitoramento das atividades por profissionais habilitados.

De acordo com essa legislação, o valor máximo do PSA pode alcançar até 3.200 (três mil e duzentos) Valores de Referência do Tesouro Estadual (VRTE) por hectare, já incluindo impostos e custos operacionais. Quanto aos contratos, estes podem variar de acordo com a modalidade, apresentando prazo mínimo de 1 ano e máximo de até 5 anos nos casos de apoio financeiro (ESPÍRITO SANTO, 2016).

Estudos recentes apontam que a adoção de instrumentos econômicos, como o PSA, aliada a práticas conservacionistas, tem potencial significativo para promover a restauração de paisagens degradadas, melhorar a segurança hídrica e aumentar a resiliência dos sistemas produtivos frente às mudanças climáticas.

Além disso, a integração entre políticas públicas, assistência técnica e participação dos produtores rurais tem se mostrado fundamental para o sucesso dessas iniciativas (Pagiola *et al.*, 2020; Coelho *et al.*, 2021; Engel; Wunder, 2022).

Dessa forma, observa-se que o fortalecimento de programas como o Reflorestar, aliado à ampliação de práticas sustentáveis no meio rural, representa um caminho promissor para a consolidação de um modelo de desenvolvimento que equilibre produção, conservação ambiental e inclusão social.

4.2. Benefícios econômicos, melhoria do solo e redução de insumos externos

A adoção de práticas sustentáveis no âmbito do Programa Reflorestar, especialmente aquelas associadas ao Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e aos Sistemas Agroflorestais (SAFs) e Silvipastoris (SSPs), tem demonstrado potencial significativo para a geração de benefícios econômicos diretos e indiretos aos produtores rurais (Figura 28).



Figura 28. Infográfico ilustrando as diferenças estruturais e funcionais entre monocultivos e SAFs em camadas. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Entre esses benefícios, destaca-se a agregação de renda, que ocorre tanto por meio da remuneração proporcionada pelo PSA quanto pela diversificação produtiva promovida por sistemas integrados de uso da terra (Trugilho *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2025b; Vieira *et al.*, 2025).

O PSA atua como um importante instrumento de complementação de renda, ao reconhecer financeiramente os serviços ecossistêmicos prestados pelos produtores, como a conservação da água, do solo e da biodiversidade. Esse mecanismo contribui para a redução da vulnerabilidade econômica das propriedades rurais, especialmente no contexto da agricultura familiar, ao oferecer uma fonte de receita adicional relativamente estável e desvinculada das oscilações de mercado típicas das commodities agrícolas (Wunder, 2005; Pagiola *et al.*, 2020).

Paralelamente, a implantação de SAFs e SSPs favorece a diversificação da produção, possibilitando a obtenção de múltiplos produtos, como alimentos, madeira, frutos, forragem e produtos não madeireiros, ao longo do ano (Figura 29). Essa diversificação contribui para a diluição de riscos produtivos e econômicos, além de promover maior estabilidade na geração de renda, uma vez que diferentes culturas apresentam ciclos produtivos distintos (Nair, 2011; Gliessman, 2015; Souza, 2025b; Vieira *et al.*, 2025).



Figura 29. Defesa biológica: Diagrama ilustrando o papel do SAF como fragmento florestal conector na paisagem fragmentada. Fonte: Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Outro aspecto relevante refere-se à melhoria da qualidade do solo, que desempenha papel central na sustentabilidade dos sistemas produtivos. A introdução de espécies arbóreas e a adoção de práticas conservacionistas favorecem o aumento da matéria orgânica, a melhoria da estrutura do solo, a maior retenção de umidade e o incremento da atividade biológica. Esses processos contribuem para a recuperação da fertilidade natural do solo e para o fortalecimento de suas funções ecológicas (Altieri, 2012; Silva; Souza, 2021; 2025).

Como consequência direta dessas melhorias, observa-se a redução da dependência de insumos externos, como fertilizantes químicos e defensivos agrícolas. A ciclagem de nutrientes promovida pelos sistemas integrados, aliada ao aumento da biodiversidade funcional, favorece o controle natural de pragas e doenças, reduzindo a necessidade de intervenções químicas. Além disso, a maior eficiência no uso da água e dos nutrientes contribui para a diminuição dos custos de produção, aumentando a rentabilidade das atividades agropecuárias (Altieri, 2012; Gliessman, 2015).

Dessa forma, a integração entre instrumentos econômicos, como o PSA, e práticas produtivas sustentáveis, como SAFs e SSPs, configura-se como uma estratégia eficaz para promover não apenas a conservação ambiental, mas também a viabilidade econômica das propriedades rurais. Essa abordagem fortalece a transição para modelos de produção mais resilientes, capazes de conciliar geração de renda, segurança alimentar e conservação dos recursos naturais.

5. Considerações

A relação entre sociedade e meio ambiente alcançou, nas últimas décadas, um nível crítico de pressão sobre os recursos naturais, evidenciando a necessidade urgente de reconfiguração dos modelos de produção e consumo. Apesar desse cenário desafiador, existem oportunidades concretas para reverter processos de degradação e promover a conservação dos ecossistemas. Nesse sentido, a adoção de estratégias integradas, participativas e territorialmente

adaptadas mostra-se fundamental para enfrentar os desafios ambientais contemporâneos e garantir um futuro sustentável para as próximas gerações.

Ao longo deste capítulo, evidenciou-se que a integração entre Sistemas Agroflorestais (SAFs) e instrumentos econômicos, como o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), constitui uma abordagem promissora para a mitigação dos impactos da degradação ambiental. Essa combinação não apenas contribui para a restauração de ecossistemas degradados, mas também promove ganhos econômicos e sociais, especialmente no contexto da agricultura familiar, ao gerar renda, diversificar a produção e fortalecer a resiliência dos sistemas produtivos.

Os SAFs, ao incorporarem árvores, arbustos e cultivos agrícolas em arranjos diversificados, promovem melhorias significativas nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, além de favorecerem a conservação da biodiversidade e a regulação dos ciclos hidrológicos. Esses sistemas contribuem para o sequestro de carbono, o aumento da atividade microbiana do solo e a melhoria da qualidade e da disponibilidade de água para plantas e animais. Trata-se, portanto, de uma estratégia que alia produtividade à conservação, fortalecendo a sustentabilidade dos agroecossistemas.

Quando associados ao PSA, esses benefícios são potencializados, uma vez que os agricultores passam a ser reconhecidos e remunerados pelos serviços ambientais prestados, como a conservação da água, do solo e da biodiversidade. Esse reconhecimento financeiro não apenas incentiva a adoção de práticas sustentáveis, mas também valoriza o papel social do produtor rural como agente ativo na proteção dos recursos naturais.

Entretanto, apesar dos avanços, ainda persistem desafios relevantes para a consolidação dessas estratégias. Destacam-se a necessidade de fortalecimento e continuidade das políticas públicas, a ampliação do acesso ao financiamento, a oferta de assistência técnica qualificada e a capacitação dos produtores rurais. Além disso, é fundamental promover a regularização documental das propriedades, de modo a facilitar o acesso a programas governamentais e instrumentos de apoio à produção sustentável.

Outro aspecto central refere-se à valorização do conhecimento tradicional e à participação ativa das comunidades locais. A construção de soluções sustentáveis exige o diálogo entre saberes científicos e práticas empíricas, reconhecendo o papel histórico dos agricultores na gestão dos recursos naturais. Esse processo fortalece o sentimento de pertencimento e engajamento, contribuindo para a continuidade e o sucesso das iniciativas implementadas.

Por fim, destaca-se a importância da conservação e recuperação do solo como elemento central para a sustentabilidade dos sistemas produtivos. O solo, enquanto recurso essencial e finito, demanda cuidados contínuos, uma vez que sua degradação compromete não apenas a produção agrícola, mas também a estabilidade dos ecossistemas e a segurança alimentar. Considerando que os processos de regeneração do solo são lentos, torna-se imprescindível a adoção imediata de práticas conservacionistas, garantindo que esse patrimônio seja preservado para as futuras gerações.

Em síntese, a integração entre SAFs e PSA revela-se não apenas uma alternativa viável, mas uma estratégia essencial para a construção de um modelo de desenvolvimento rural sustentável, no qual produção agrícola e conservação ambiental avancem de forma complementar. Investir nessa abordagem significa promover equilíbrio ecológico, justiça social e viabilidade econômica, pilares indispensáveis para um futuro mais resiliente e sustentável.

6. Referências

ABDO, M. T. V. N.; VALERI, S. V.; MARTINS, A. L. M. Sistemas agroflorestais e agricultura familiar: uma parceria interessante. **Revista Tecnologia & Inovação Agropecuária**, p.50-59, 2008.

ALMEIDA, D. S. de. Conceitos básicos. *In*: ALMEIDA, D. S. de. **Recuperação ambiental da Mata Atlântica**. 3. ed. rev. ampl. Ilhéus, BA: Editus, 2016. p. 24-30. Disponível em: <http://books.scielo.org>.

ALMEIDA JÚNIOR, P.; PEREIRA, E. R. Degradação Ambiental e a diversidade biológica/biodiversidade: uma revisão integrativa. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v. 14, n. 26, p. 922-937, 2017.

ALTIERI, M. A. **Agroecologia**: bases científicas para uma agricultura sustentável. 3. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2012.

ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Manual de conservação de água e solo em propriedades rurais**. Brasília: ANA, 2021.

ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Programa Produtor de Água**: manual operativo. Brasília: ANA, 2012.

BALSAN, R. Impactos Decorrentes da Modernização da Agricultura Brasileira. CAMPO TERRITÓRIO: **Revista de Geografia Agrária**, Francisco Beltrão, v. 1, n. 2, p.123-151, 2006.

BARRETO, P.; SARTORI, M. **Levantamento de áreas agrícolas degradadas no Estado do Espírito Santo**. Vitória: Cedagro, 2012.

BARROS, F. S. **A ação do homem no processo de destruição do cerrado**. Trabalho de conclusão de curso de geografia. Faculdade Projeção, Taguatinga-DF, 2009.

BENICÁ, D.; CLEMENTE, E. **Pagamento por serviços ambientais**: percepção de produtores rurais. 2021.

BERNARDI, A. **Conservação do solo garante segurança alimentar e sustentabilidade da agropecuária**. Brasília, DF: Embrapa, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/99741033/artigo-conservacao-do-solo-garante-seguranca-alimentar-e-sustentabilidade-da-agropecuaria>.

BRAGA, M. B.; LIMA, PACHECO, C. E. **Reuso de água na agricultura**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. 211 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1000676/reuso-de-agua-na-agricultura>.

BRASIL. **Decreto Nº 97.632, de 10 de abril de 1989**. Dispõe sobre a regulamentação do Artigo 2º, inciso VIII, da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Poder Executivo, Brasília, DF, 12 de abr. 1989. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/d97632.htm>. Acesso em: 07 jul. 2024.

BRASIL. **Lei nº 10.179, de 6 de fevereiro de 2014**. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, institui o Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado do Espírito Santo – SIGERH/ES e dá outras providências. Diário Oficial [do] Estado do Espírito Santo, Vitória, ES, 6 fev. 2014. Disponível em: <https://www3.al.es.gov.br/Arquivo/Documents/legislacao/html/LO10179.html>. Acesso em: 07 jul. 2024.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**: Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Brasília, 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm>. Acesso em: 15 jul.2025.

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, 2021.

BRASIL. **Lei Nº 6.938, de 31 de agosto de 1981.** Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 31 ago. 1981. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm>. Acesso em: 13 jun. 2024.

CHOUDHARY, M. P.; CHAUHAN, G. S.; KUSHWAH, Y. **Environmental degradation:** causes, impacts and mitigation. Conference: National Seminar on Recent Advancements in Protection of Environment and its Management Issues, India, p.1-4, 2015.

COELHO, A. B. *et al.* Serviços ambientais e instrumentos econômicos no Brasil. **Revista de Política Agrícola**, 2021.

COELHO, N. R. Panorama das iniciativas de pagamento por serviços ambientais hídricos no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n.3, p.409-415, 2021.

COSTA, B. M. da; CLEMENTE, E. C. O programa “produtor de água” como proposta de fortalecimento socioeconômico e de recuperação dos recursos naturais. **Geosul**, v. 36, n. 78, p. 356-380, 2021.

COSTA, T. G. A.; IWATA, B. DE F.; TOLEDO, C.DE. E.; COELHO, J. V.; CUNHA, L. M.; CLEMENTINO, G. E. DOS S.; LEOPOLDO, N.C.M. Dinâmica de Carbono do Solo em Unidade de Conservação do Cerrado Brasileiro sob diferentes fitofisionomias. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 4. p.306-323, 2018.

COUTO, E. P.; SILVA, F. O. Desenvolvimento (in) sustentável. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 10, n. 8, p.41-54, abr.2014. ISSN: 2317-2606.

DEUS, R. M.; BAKONYI, S. M. C. O impacto da agricultura sobre o meio ambiente. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 7, n. 7, p. 1306-1315, 2012.

DOMINGUES, J. dos S. Impacto do uso de fertilizantes nitrogenados. In: CASTOLDI, R. **Conversando sobre meio ambiente e saúde:** uma abordagem popular. Canoas, RS, Brasil: Mérida Publishers, 2024. cap. 3. p. 34-49. Disponível em: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-28-2.c3>.

ENGEL, S.; PAGIOLA, S.; WUNDER, S. Designing payments for environmental services in theory and practice. **Ecological Economics**, v. 65, p. 663-674, 2008.

ENGEL, S.; WUNDER, S. Payments for environmental services: theory and practice. **Annual Review of Resource Economics**, v. 14, p. 1-22, 2022.

ESPÍRITO SANTO (Estado). **Lei nº 10.583, de 18 de outubro de 2016.** Altera a Lei nº 9.864, de 26 de junho de 2012, que dispõe sobre a reformulação do Programa de Pagamentos por Serviços Ambientais – PSA no Estado. Vitória: Diário Oficial [do Estado do Espírito Santo], 19 out. 2016.

ESPÍRITO SANTO (Estado). Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Manual Operacional do Programa Reflorestar: MOP Reflorestar**. Vitória: SEAMA, 2024.

FERREIRA, E. M.; ANDRAUS, M. DE P.; CARDOSO, A. A.; COSTA, L. F. DOS S.; LÔBO, L. M.; LEANDRO, W. M. Recuperação de áreas degradadas, adubação verde e qualidade da água. **Revista Monografias Ambientais**, v. 15, n.1, p.228-246, 2016.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável**. 3ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

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

HASNAT, A. *et al.* **Environmental degradation: its causes, effects and restoration**.

JOHNSON, D. L.; AMBROSE, S. H.; BASSET, T. J.; BOWEN, M. L.; CRUMMEY, D. E.; ISAACSON, J. S.; JOHNSON, D. N.; LAMB, P.; SAUL, S.; WINTER-NELSON, A. E. Meanings of Environmental Terms. **Journal of Environmental Quality**, South Segoe Rd., Madison, v. 26, n. 3, p. 581-589, 1997.

KRÜGER, S. C.; BROTHA, A.; BOWERMAN, W.; COVERDALE, B.; GORE, L. M.; HEEVER, L. V. D.; SHAFFER, J. L.; SMIT-ROBINSON, H.; THOMPSON, J. L.; OTTINGER, M. A. Old World Vultures Reflect Effects of Environmental Pollutants Through Human Encroachment. **Environmental Toxicology and Chemistry**, [s. l.], v. 41, n. 7, p. 1586-1603, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/etc.5358>.

LAYRARGUES, P. P. Educação para a gestão ambiental: a cidadania no enfrentamento político dos conflitos socioambientais. In: LOUREIRO, C. F. B.; LAYRARGUES, P. P.; CASTRO, R. S. (Org.). **Sociedade e meio ambiente: a educação ambiental em debate**. 3. ed. São Paulo: Cortez, p. 87-155, 2002.

LEMONS, J. J. S. Níveis de degradação no Nordeste Brasileiro. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 32, n. 3, p. 406-429, 2001.

MAPBIOMAS. **Desmatamento nos biomas do Brasil cresceu 22,3% em 2022**. 2023. Disponível em: <<https://brasil.mapbiomas.org/2023/06/12/desmatamento-nos-biomas-do-brasil-cresceu-223-em-2022/>>. Acesso em: 07 jul. 2024.

MAPBIOMAS. **Relatório Anual do Desmatamento no Brasil 2024**. São Paulo: MapBiomass, 2025. 208 p.

MAURYA, P.K.; ALI, S. A.; AHMAD, A.; ZHOU, Q.; CASTRO, J. DA S.; KHAN, E.; ALI, H. An introduction to environmental degradation: Causes, consequence and mitigation. In: **Environmental Degradation: Causes and Remediation Strategies**. v. 1, Agriculture and Environmental Science Academy, Haridwar, India, p.1-20, 2020.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Quinto Relatório Nacional para a Convenção da Biodiversidade. Brasília: MMA, 2016. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/informma/item/10772-quinto-relat%C3%B3rio>>. Acesso em: 08 jul. 2024.

MURADIAN, R. A. M.; PELLEGRINI, L.; ADAMAN, F.; AGUILAR, B.; AGARWAL, B.; CORBERA, E.; EZZINE DE BLAS, D.; FARLEY, J.; FROGER, G.; GARCIA-FRAPOLLI, E.; GÓMEZ-BAGGETHUN, E.; GOWDY, J.; KOSOY, N.; LE COQ, J. F.; LEROY, P. Payments for ecosystem services and the fatal attraction of win-win solutions. **Conservation Letters**, v. 6, n. 4, p. 247-279, 2013.

MURADIAN, R. *et al.* Reconciling theory and practice: an alternative conceptual framework for understanding payments for environmental services. **Ecological Economics**, v. 69, p. 1202-1208, 2010.

NAIR, P. K. R. **Agroforestry systems and environmental quality**. Boca Raton: CRC Press, 2011.

ONU BRASIL. **Agenda 2030**: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Brasília: Organização das Nações Unidas no Brasil, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 15 jul. 2025.

ONU. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando nosso mundo**: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. 2015.

PAGIOLA, S. *et al.* **Evaluation of payment for environmental services programs**. Washington, DC: World Bank, 2020.

PINTO, N. G. M.; CORONEL, A. D.; LOPES, M. M.; SILVA, A. R. A. da. **Degradação Ambiental no Brasil**: uma análise das evidências empíricas. 1º Seminário de jovens pesquisadores em economia e desenvolvimento. p.1-16, 2019.

SABOYA, R. de C. C.; BRITO, M. de J. D. de.; COLLIER, L. dos S.; SABOYA, L. M. F.; LIMA, S. de O. **Identificação de solos e paisagem do assentamento Vale Verde, Gurupi, TO, para fins de aptidão agrícola**. In: Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 227. Planaltina-DF: Embrapa Cerrados, ISSN 1676-918X, 2008.

SHILPAHILPA, S.; SHETTY, D. D. A.; HARSHITHA, S. A.; SHIPRA, S. B.; PRASHANTH, B.; NAIK, C.; SUCHETHA, K. N. A. D.; HARISHKUMAR, M. Environmental pollutants and their effects on human health. **Heliyon**, [s. l.], v. 9, n. 9, e19496, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19496>.

SILVA, D. D. E.; FELIZMINO, F. T. A.; OLIVEIRA, M. G. Avaliação da degradação ambiental a partir da prática da cultura do feijão no município de Tavares- PB. **HOLOS**, Ano 31, v.8, p.148-165, 2015.

SILVA, J. M. V. O. da ; SOUZA, M. N. *et al.* **Produção de café orgânico**: práticas agroecológicas conservacionistas e novas tecnologias disponíveis ao produtor rural. 1. ed. Mauritius: Novas Edições Acadêmicas, 2021. 76p.

SILVA, P. H. V, GONÇALVES, F. J. de O.; ALVES, M.C.;SARAN, L. M. Micorremediação de agrotóxicos no solo: uma revisão narrativa focada no Brasil, um dos maiores países agrícolas. In: **Sistemas sustentáveis de produção agrícola**: Estratégias mitigatórias das atividades antrópicas, resiliência agrícola e conservação da biodiversidade. São Paulo: Editora científica, 2025. cap. 3. Disponível em: <https://doi.org/10.37885/250719756>.

SILVA, R. G. da; RIBEIRO, C. G. Análise da Degradação Ambiental na Amazônia Ocidental: um Estudo de Caso dos Municípios do Acre. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Rio de Janeiro, v. 42, n. 1, p.91-110, 2004.

SILVEIRA, S. S. B.; SANT'ANNA, F. S. P. Poluição hídrica. In: MARGULIS, S. (Ed.). **Meio ambiente**: aspectos técnicos e econômicos. Brasília: IPEA/PNUD, 1990. p. 61- 63.

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

SOUZA, L. R. de S. A modernização da agricultura brasileira, agricultura familiar, agroecologia e pluriatividade: Diferentes óticas de entendimento e de construção do espaço rural brasileiro. **Cuadernos de Desarrollo Rural**, Bogotá, v. 8, n. 67, p.231-249, 2011.

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

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

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

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

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

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

SOUZA, M. N. **Tópicos em gestão ambiental. Vol. III.** 1. ed. Canoas: Mérida Publisers, 2021.

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

STEENBOCK, W.; SILVA, L. C.; SILVA, O. R.; RODRIGUES, S. A.; PEREZ-CASSARINO, J.; FONINI, R. Agroflorestas e sistemas agroflorestais no espaço e no tempo. **Agrofloresta, ecologia e sociedade**. Curitiba, p. 39-60, 2013.

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.

TUNDISI, J. G. **Recursos hídricos no Brasil: Problemas, desafios e estratégias para o futuro**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, p.76, 2014.

UGC CARE Listed (Group -I) **Journal**, v. 11, p. 1492-1501, 2022.

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>

WANDELLI, E.; OCIDENTAL, E. A. **Serviços ambientais de sistemas agroflorestais**. Embrapa Amazônia Ocidental-Capítulo em livro técnico-científico. Editora Embrapa, p.53-55, 2010. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/877912/servicos-ambientais-de-sistemas-agroflorestais>. Acesso em: 08 de julho de 2024.

WUNDER, S. Payments for environmental services: some nuts and bolts. **CIFOR Occasional Paper**, n. 42, 2005.

XAVIER, C. K. S.; MEDEIROS, J. D. Degradação de recursos hídricos: água fator de saúde pública. **Revista UNI-RN**, Natal, v. 17, n. 1/2, p. 65-80, 2017.

ZIMMER, A. H.; MACEDO, M. C. M.; KICHEL, A. N.; ALMEIDA, R. G. de. **Degradação, recuperação e renovação de pastagens**. Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2012. 43 p. (Documentos / Embrapa Gado de Corte, ISSN 1983-974X, 189). Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/950153/degradacao-recuperacao-e-renovacao-de-pastagens>.

CAPÍTULO 5

Uso de resíduos orgânicos na formulação de substratos para a produção de mudas de espécies florestais nativas da Mata Atlântica

Gabriel Souza Mendonça, Rony Mendes Rodrigues, Sara de Oliveira Olimpio, Ana Terra Bravim dos Santos, Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira, Willian Moreira da Costa, Atanásio Alves do Amaral, Maurício Novaes Souza

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-45-9.c5>

Resumo

A restauração ecológica da Mata Atlântica, um dos biomas mais biodiversos e ameaçados do mundo, demanda estratégias eficientes e sustentáveis para a recomposição da vegetação nativa. Nesse contexto, a produção de mudas de espécies florestais constitui etapa essencial para o sucesso das ações de recuperação. Assim, este estudo teve como objetivo analisar o uso de resíduos orgânicos na formulação de substratos para produção de mudas nativas, considerando aspectos técnicos, microbiológicos e sua aplicação em viveiros, com ênfase em iniciativas comunitárias. A pesquisa se baseou na revisão de literatura científica recente, especialmente de estudos desenvolvidos no Brasil, que abordam as propriedades físicas, químicas e biológicas de substratos alternativos e seus efeitos no desenvolvimento de mudas. Os resultados indicam que resíduos, tais como: casca de café, fibra de coco, casca de arroz carbonizada e bagaço de cana-de-açúcar, apresentam elevado potencial como componentes de substratos, contribuindo para melhorias na estrutura física, retenção de água e disponibilidade de nutrientes. A incorporação desses materiais, entre 30% e 40%, favorece o crescimento vegetal e o desenvolvimento radicular, além de estimular a atividade microbiológica e aumentar a resistência das plantas ao estresse. Seu uso também reduz custos de produção e fortalece viveiros comunitários, configurando-se como alternativa viável e sustentável.

Palavras-chave: Viveiros florestais. Substratos alternativos. Reaproveitamento de resíduos. Microbiota do solo. Crescimento radicular. Sustentabilidade agrícola.

1. Introdução

O avanço da degradação ambiental no território brasileiro, intensificado por processos históricos de uso inadequado do solo, fragmentação florestal e expansão agropecuária, tem imposto desafios significativos às políticas públicas de restauração ecológica. Nesse contexto, destaca-se a necessidade de recomposição de Áreas de Preservação Permanente (APPs) e Reservas Legais (RLs), especialmente em biomas altamente impactados. A Mata Atlântica, em particular, caracteriza-se por elevados níveis de biodiversidade associados a intensos graus de degradação e fragmentação, o que reforça a urgência de intervenções fundamentadas em princípios ecológicos consistentes (Almeida *et al.*, 2021; Egidio; Souza, 2025).

Diante desse cenário, a produção de mudas de espécies florestais nativas assume papel estratégico nas iniciativas de recuperação, não apenas para a recomposição da cobertura vegetal, mas também para a promoção da resiliência ecológica e da funcionalidade dos ecossistemas restaurados (Rezende *et al.*, 2018; Fonseca *et al.*, 2021). A qualidade dessas mudas está diretamente relacionada a fatores técnicos e operacionais, entre os quais se destaca a composição do substrato.

O substrato deve proporcionar condições adequadas para a germinação, o desenvolvimento do sistema radicular, a nutrição e o crescimento vegetativo das plantas até a fase de rustificação (Rosa *et al.*, 2023). Sob o ponto de vista técnico, materiais utilizados como substrato devem apresentar equilíbrio entre propriedades físicas, químicas e biológicas, incluindo densidade aparente adequada, elevada porosidade total (idealmente entre 50% e 85%), boa capacidade de retenção hídrica, aeração eficiente, capacidade de troca de cátions (CTC) e pH compatível com as exigências das espécies cultivadas (Oliveira *et al.*, 2016; Ferreira *et al.*, 2019).

Tradicionalmente, viveiros comerciais utilizam substratos formulados com terra vegetal, vermiculita, perlita, casca de pinus e, frequentemente, turfa importada. No entanto, a extração da turfa está associada a impactos ambientais negativos significativos, além de elevar os custos de produção, o que limita sua adoção, sobretudo em viveiros de pequeno porte e em iniciativas comunitárias

(Camargo *et al.*, 2021). Esse cenário evidencia a necessidade de alternativas mais sustentáveis e economicamente viáveis.

Nesse sentido, o aproveitamento de resíduos orgânicos de origem agrícola, agroindustrial e urbana tem se destacado como uma estratégia promissora. Materiais como casca de café, casca e palha de arroz, fibra de coco, bagaço de cana-de-açúcar, esterco animal, compostos orgânicos e lodo de esgoto tratado apresentam características físico-químicas que favorecem o desenvolvimento de mudas, sendo cada vez mais investigados como componentes de substratos (Arruda *et al.*, 2017; Alonso *et al.*, 2022).

A Figura 1 apresenta, em um estudo realizado no IFES/UFES, o desempenho da emergência de plântulas de ipê-amarelo (*Tabebuia chrysotricha*) em função da substituição parcial do substrato comercial por palha de café. Observa-se que a incorporação desse resíduo agrícola em proporções de até 20% resultou em aumento no número de plântulas emergidas, indicando efeito positivo sobre a germinação.

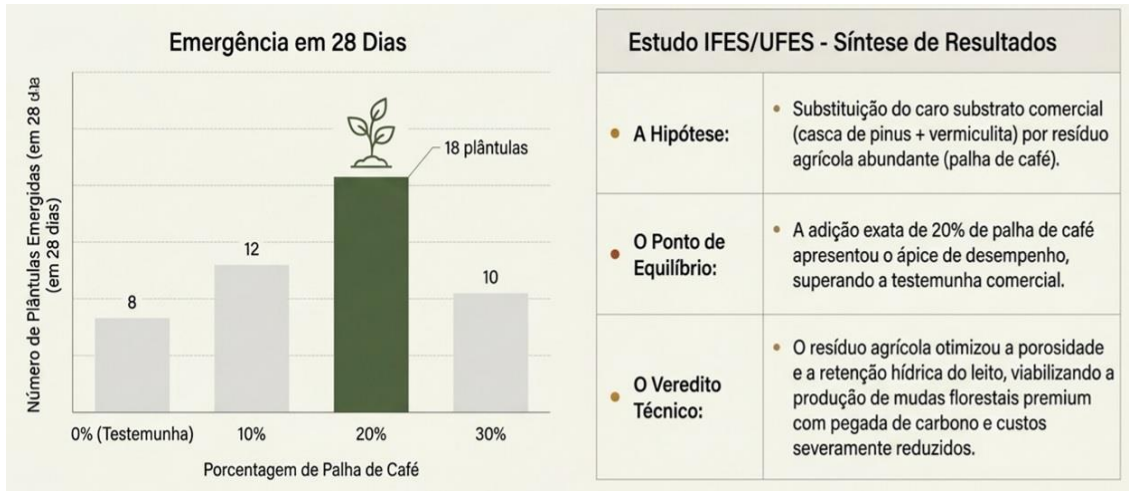


Figura 1. Desempenho da emergência do Ipê-Amarelo (*Tabebuia chrysotricha*) em substituição ao substrato comercial. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Esse desempenho pode ser atribuído, sobretudo, à melhoria das propriedades físicas do substrato, especialmente ao aumento da porosidade e à melhor distribuição dos espaços porosos, o que favorece simultaneamente a retenção de água e a aeração. Essas condições são fundamentais para o

processo germinativo, pois garantem disponibilidade hídrica adequada e oxigenação do embrião, promovendo um ambiente mais favorável ao desenvolvimento inicial das plântulas (Souza, 2025).

Além disso, a adição de palha de café pode contribuir para o incremento da matéria orgânica e da atividade microbiológica do substrato, criando condições mais equilibradas para o estabelecimento inicial das plantas. No entanto, proporções superiores podem comprometer o desempenho, possivelmente em função de alterações na relação C/N ou da presença de compostos fitotóxicos, reforçando a importância do manejo adequado e da definição de proporções ideais de uso (Alonso *et al.*, 2022; Souza, 2025).

A valorização desses resíduos contribui não apenas para a redução dos custos de produção, mas também para a mitigação de impactos ambientais associados ao seu descarte inadequado (Figura 2). Assim, ao integrar eficiência técnica, viabilidade econômica e sustentabilidade ambiental, o uso de resíduos orgânicos na formulação de substratos configura-se como uma alternativa relevante para viveiros florestais e programas de restauração ecológica no Brasil (Souza, 2025).

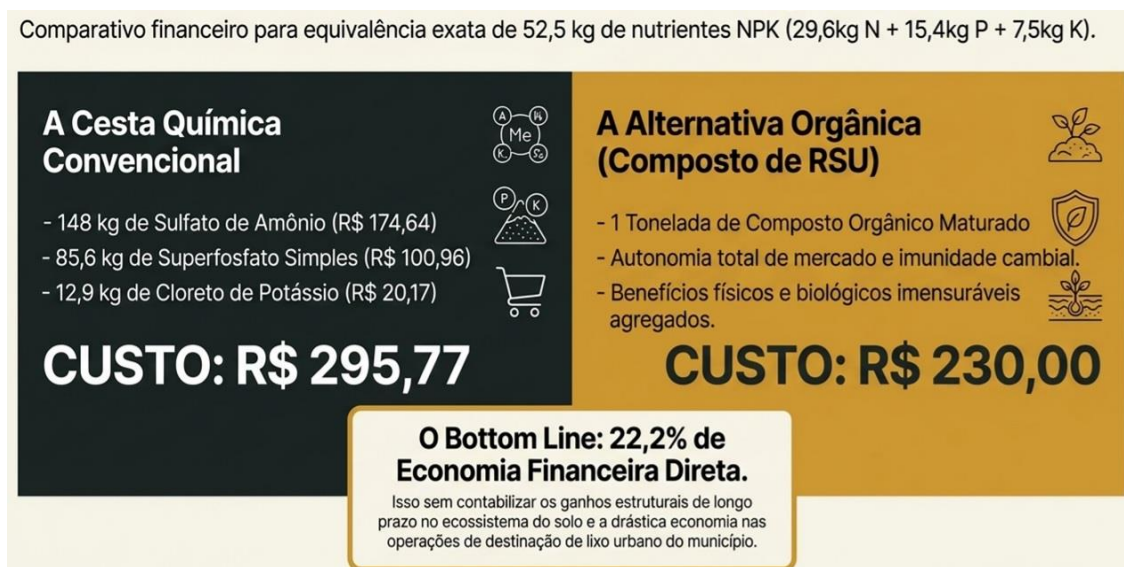


Figura 2. Análise de Desempenho Econômico entre Sistemas Convencionais e Orgânicos. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Diante desse contexto, o presente capítulo tem como objetivo analisar criticamente o uso de resíduos orgânicos na formulação de substratos para a produção de mudas de espécies florestais nativas da Mata Atlântica, abordando aspectos técnicos, ambientais e socioeconômicos, bem como suas implicações para a sustentabilidade de sistemas de restauração ecológica.

2. A importância da produção de mudas nativas e do substrato

A produção de mudas de espécies nativas constitui um elo fundamental entre as diretrizes das políticas públicas de restauração ecológica e a efetiva recuperação dos ecossistemas degradados. A qualidade das mudas é determinante para o sucesso do estabelecimento em campo, influenciando diretamente a sobrevivência inicial, o crescimento e a estabilidade das espécies em áreas submetidas a diferentes níveis de degradação ambiental (Fonseca *et al.*, 2021).

O uso de espécies nativas, por sua vez, favorece a manutenção da biodiversidade e a recomposição das funções ecossistêmicas, além de contribuir para o aumento da resiliência dos sistemas restaurados frente às mudanças climáticas e a eventos extremos (Chazdon *et al.*, 2020; Souza, 2025). Além disso, essas espécies apresentam maior adaptação às condições edafoclimáticas locais, o que potencializa o estabelecimento inicial e reduz a dependência de insumos externos, em consonância com os princípios da agroecologia e da restauração baseada na natureza (Rezende *et al.*, 2018).

Nesse contexto, a escolha e o manejo do substrato assumem papel central no processo produtivo. O substrato influencia diretamente a qualidade morfofisiológica das mudas, refletindo-se no vigor, na relação parte aérea/raiz e no acúmulo de biomassa (Ferreira *et al.*, 2019). Propriedades como textura, porosidade, capacidade de retenção hídrica e capacidade de troca de cátions (CTC) são atributos essenciais a serem considerados na sua formulação.

Os atributos que definem o sucesso de um substrato orgânico estão diretamente relacionados à integração equilibrada de suas propriedades físicas, hídricas e biológicas. Do ponto de vista técnico, a adequada definição e o

equilíbrio desses parâmetros são indispensáveis para garantir o desempenho dos substratos na produção de mudas florestais.

Além disso, a atividade microbiológica desempenha papel estratégico na mineralização de nutrientes e na promoção do crescimento vegetal, contribuindo para o desenvolvimento radicular mais eficiente. A estabilidade estrutural do substrato ao longo do tempo também é um fator crítico, pois evita a compactação e assegura a manutenção da aeração e da drenagem adequadas. Outro aspecto relevante refere-se à origem dos materiais utilizados, sendo preferível o uso de resíduos orgânicos locais, o que reduz custos, agrega valor ambiental e fortalece práticas alinhadas à sustentabilidade. Por fim, a adequação do substrato às exigências específicas de cada espécie florestal reforça a necessidade de ajustes técnicos finos, visando maximizar o desempenho das mudas em campo (Figura 3).

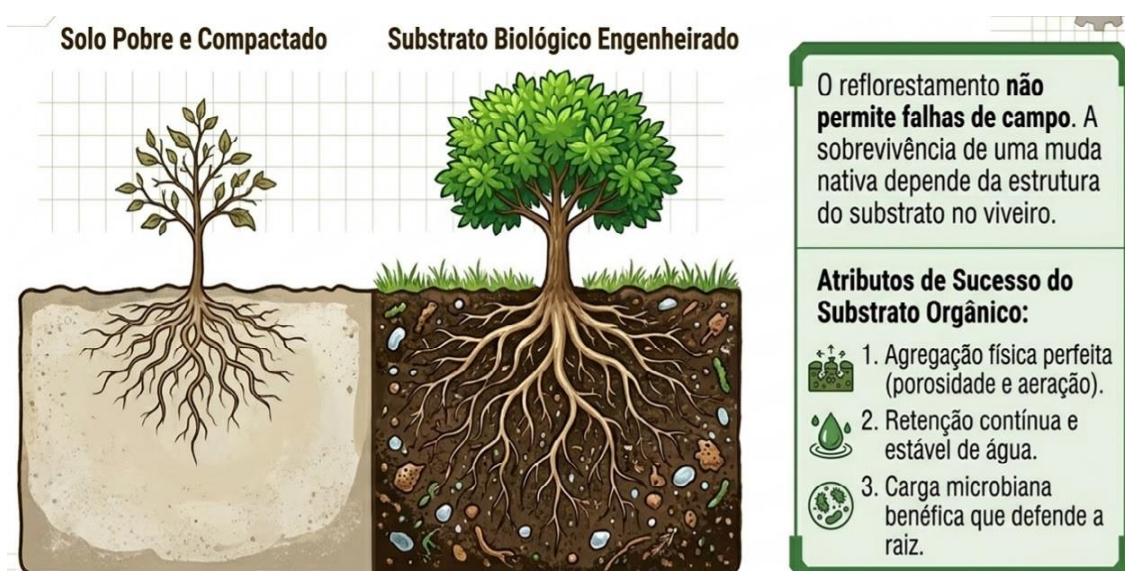


Figura 3. Mudanças de alta *performance* como vetores de regeneração ecossistêmica. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

A sinergia entre propriedades físicas, químicas e biológicas determina a qualidade final do substrato e, conseqüentemente, o vigor das mudas produzidas. Nesse sentido, a Tabela 1 apresenta valores de referência para atributos físicos e químicos considerados ideais, servindo como base para a formulação e avaliação de materiais alternativos, bem como para o ajuste de

misturas que atendam às exigências das diferentes espécies nativas (Fragoso *et al.*, 2016; Ferreira *et al.*, 2019).

Os atributos que definem o sucesso de um substrato orgânico estão diretamente relacionados à integração equilibrada de suas propriedades físicas, hídricas e biológicas. Do ponto de vista físico, destaca-se a adequada agregação estrutural, responsável por garantir níveis ideais de porosidade e aeração, favorecendo o crescimento radicular e as trocas gasosas. Em termos hídricos, o substrato deve apresentar capacidade de retenção de água contínua e estável, assegurando disponibilidade hídrica às mudas sem comprometer a drenagem.

Tabela 1. Parâmetros físicos e químicos ideais de substratos para produção de mudas florestais

Parâmetro	Faixa recomendada	Importância para as mudas
Densidade aparente (g cm ⁻³)	0,2 – 0,8	Evita a compactação do substrato e favorece o crescimento radicular
Porosidade total (%)	50 – 85	Proporciona equilíbrio entre retenção de água e aeração
Macroporosidade (%)	20 – 30	Essencial para aeração e respiração radicular
Microporosidade (%)	25 – 55	Responsável pela retenção de água disponível para as plantas
Capacidade de retenção de água	Alta	Garante disponibilidade hídrica adequada ao desenvolvimento das mudas
pH	5,0 – 6,5	Faixa ideal para a absorção de nutrientes
Condutividade elétrica (dS m ⁻¹)	0,5 – 2,0	Indica níveis adequados de sais solúveis, evitando toxidez
Matéria orgânica (%)	> 20	Atua como fonte de nutrientes e melhora a estrutura do substrato
Capacidade de troca de cátions (CTC)	Média a alta	Favorece a retenção e a disponibilidade de nutrientes
Relação C/N	10:1 – 20:1	Indica estabilidade do material orgânico e equilíbrio na mineralização de nutrientes

Fonte: Adaptada de Fragoso *et al.* (2016) e Ferreira *et al.* (2019).

No aspecto biológico, a presença de uma microbiota benéfica e funcional desempenha papel fundamental, especialmente pela interação com o sistema radicular, contribuindo para a ciclagem de nutrientes e a promoção do crescimento vegetal. Essa interação planta-microrganismo aumenta a resiliência das mudas e favorece sua adaptação às condições de campo.

Além disso, o substrato deve apresentar estabilidade física ao longo do tempo, resistindo à compactação e mantendo condições adequadas para o desenvolvimento do sistema radicular (Souza *et al.*, 2021). Substratos estruturalmente estáveis contribuem para a manutenção da porosidade e da aeração, fatores essenciais para o crescimento saudável das mudas. No entanto, muitos substratos comerciais são formulados com materiais de alto custo ou associados a impactos ambientais relevantes, como a turfa, cuja extração ocorre em ecossistemas úmidos e ecologicamente sensíveis. Nesse contexto, a busca por alternativas mais sustentáveis tem direcionado a atenção para o uso de materiais regionais, de menor custo e reduzida pegada ecológica (Figura 4).

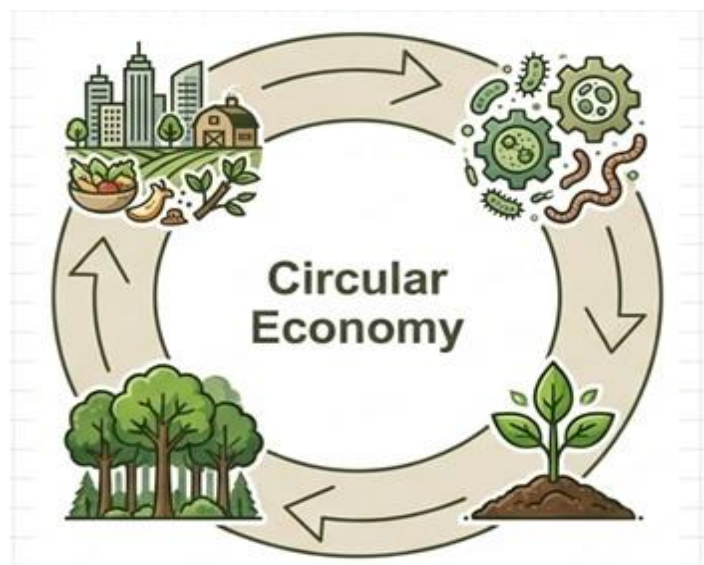


Figura 4. Sinergia Nutricional: A Eficiência Biológica de Substratos Orgânicos Circulares. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

No contexto da economia circular, os substratos orgânicos não devem ser compreendidos como meros substitutos paliativos de fertilizantes químicos, mas como componentes estruturantes de um novo paradigma produtivo, baseado na

valorização dos ciclos naturais e no uso eficiente dos recursos. A incorporação de resíduos orgânicos na formulação de substratos representa uma estratégia que transcende a substituição de insumos, ao promover a recirculação de nutrientes, o aumento da matéria orgânica no solo e a restauração de processos ecológicos fundamentais. Nesse sentido, o domínio técnico sobre a matéria orgânica, sua origem, processamento e aplicação, constitui um dos pilares para a construção de sistemas produtivos mais resilientes e sustentáveis (Mendonça *et al.*, 2026)

Sob essa perspectiva, os resíduos deixam de ser passivos ambientais e passam a assumir papel estratégico na construção da sustentabilidade do futuro. Ao serem reinseridos nos sistemas produtivos, esses materiais contribuem para a formação de solos mais vivos, estruturados e férteis, capazes de sustentar o desenvolvimento de espécies florestais e a recuperação de ecossistemas degradados. Assim, pode-se afirmar que os resíduos orgânicos, quando adequadamente manejados, representam as “florestas do futuro”, pois viabilizam não apenas a produção de mudas de qualidade, mas também a reconstrução das bases ecológicas necessárias para a restauração ambiental em larga escala (Souza, 2025).

Dessa forma, a integração entre conhecimento técnico, saberes tradicionais e evidências oriundas da pesquisa científica mostra-se fundamental para subsidiar a escolha de substratos adequados e promover a produção de mudas de alta qualidade em viveiros de diferentes escalas (Rosa *et al.*, 2023). Essa articulação permite não apenas a validação científica de práticas empíricas, mas também a adaptação de tecnologias às realidades locais, considerando a disponibilidade de recursos e as condições ambientais específicas.

Além disso, favorece a construção de soluções mais acessíveis e eficientes, ampliando a autonomia produtiva de viveiros comunitários e fortalecendo a sustentabilidade dos sistemas de produção. Nesse contexto, o diálogo entre diferentes formas de conhecimento torna-se essencial para o desenvolvimento de estratégias inovadoras e socialmente inclusivas na produção de mudas florestais.

Ressalta-se, ainda, que a formulação de substratos deve contemplar não apenas atributos físicos e químicos, mas também aspectos biológicos, como a

presença de microrganismos benéficos. Esses organismos desempenham papel relevante na promoção do crescimento vegetal, na ciclagem de nutrientes e na melhoria da eficiência nutricional, contribuindo para a produção de mudas mais vigorosas e melhor adaptadas às condições de campo (Silva *et al.*, 2022).

3. Potencial biotecnológico de resíduos orgânicos como matriz de substratos

O uso de resíduos orgânicos como componentes de substratos para a produção de mudas de espécies nativas tem ganhado destaque nos últimos anos, configurando-se não apenas como alternativa para a destinação ambientalmente adequada desses materiais, mas também como estratégia técnica eficiente. Muitos desses resíduos apresentam características físico-químicas favoráveis, como elevada porosidade, alto teor de matéria orgânica e aporte significativo de macro e micronutrientes, além de contribuírem para o desenvolvimento do sistema radicular e para o estímulo à microbiota benéfica do substrato (Alonso *et al.*, 2022) (Figura 5).



Figura 5. Interdependência funcional do solo: a sinergia entre atributos físicos, químicos e biológicos. Fonte: Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

A casca de café, por exemplo, apresenta propriedades relevantes quando devidamente compostada, como elevada capacidade de troca de cátions (CTC), boa retenção hídrica e fornecimento de nutrientes, especialmente potássio e magnésio. Estudos indicam que sua incorporação em substratos favorece o

crescimento de mudas de espécies como *Joannesia princeps* e *Inga vera* subsp. *affinis*, além de contribuir para a redução dos custos de produção (Almeida *et al.*, 2021; Faria *et al.*, 2021). Contudo, seu uso *in natura* não é recomendado, em função da presença de compostos fenólicos e da elevada relação C/N, sendo necessária a compostagem prévia para redução da fitotoxicidade e estabilização do material (Silva *et al.*, 2020) (Figura 6).



Figura 6. Processamento biológico da casca de café: transformação em substrato de alta performance. Fonte: Maurício Novaes (2026), adaptado de Silva *et al.* (2020) e Almeida *et al.* (2021); Faria *et al.* (2021), com auxílio de ferramenta de IA (Google Gemini).

A fibra de coco, por sua vez, destaca-se por sua estrutura fibrosa, baixa densidade, elevada porosidade e boa capacidade de drenagem, características que a tornam amplamente utilizada em viveiros comerciais e experimentais, especialmente após processos adequados de lavagem e maturação (Silva *et al.*, 2025).

Outros resíduos de relevância incluem o bagaço de cana-de-açúcar, a casca de arroz carbonizada e o esterco curtido. O bagaço, após compostagem, contribui para o aumento do teor de matéria orgânica estável e para o fornecimento gradual de nutrientes. A casca de arroz carbonizada, por sua vez, melhora a aeração do substrato e reduz riscos de encharcamento e apodrecimento radicular, enquanto o esterco curtido atua como importante fonte de nutrientes e microrganismos benéficos.

Adicionalmente, o uso de biossólidos e lodo de esgoto tratado, desde que em conformidade com as normas ambientais e sanitárias vigentes, tem sido validado por estudos que demonstram seu potencial para enriquecer substratos com nitrogênio, fósforo e micronutrientes (Arruda *et al.*, 2017; CONAMA, 2020; Alonso *et al.*, 2022). O aproveitamento desses materiais está alinhado aos princípios da economia circular, contribuindo para a redução de passivos ambientais e para a promoção de sistemas produtivos mais sustentáveis.

A Figura 7 ilustra exemplos de resíduos orgânicos processados utilizados na formulação de substratos, evidenciando a diversidade de materiais disponíveis para uso em viveiros florestais. Ressalta-se que o desempenho desses insumos está diretamente relacionado ao seu processamento prévio e às proporções empregadas nas misturas, aspectos fundamentais para garantir a qualidade final do substrato.

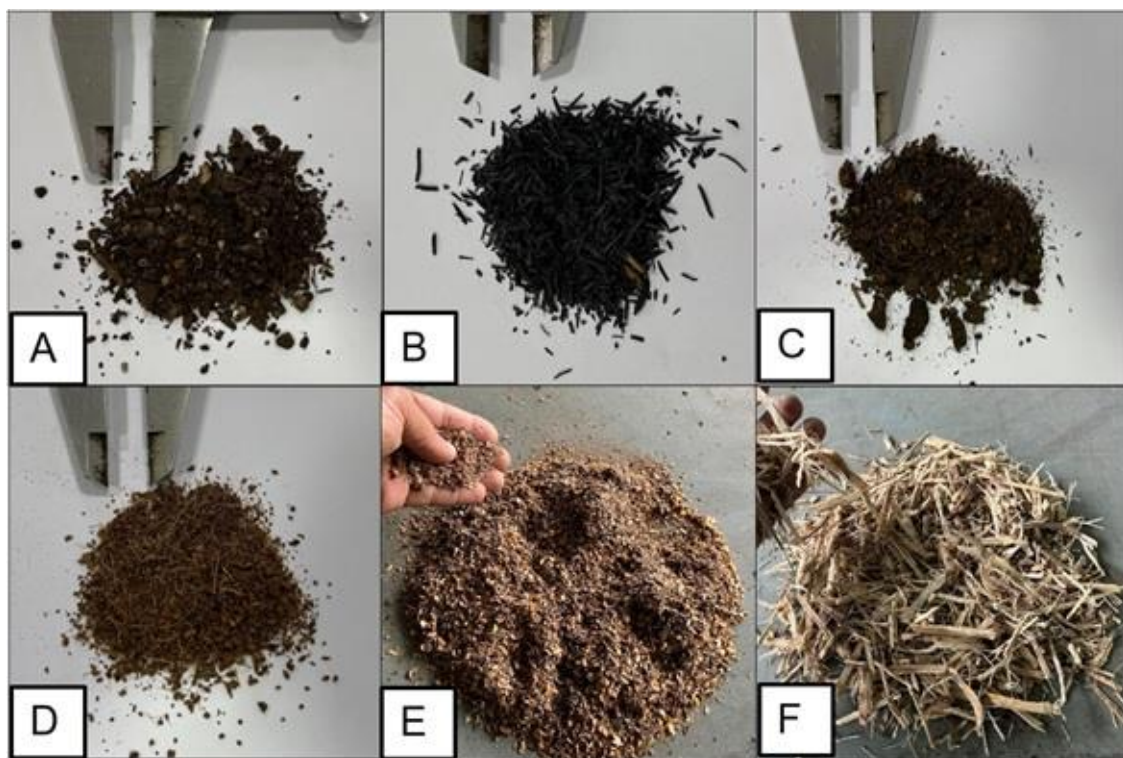


Figura 7. Variedade de substratos orgânicos. A) Substrato processado de casca de pinus; B) Substrato processado de palha de arroz carbonizado; C) Substrato processado de esterco bovino; D) Substrato processado de fibra de coco; E) Substrato de casca de café; F) Substrato de bagaço de cana-de-açúcar. Fonte: Acervo do IFES campus Alegre, 2025.

A casca de pinus processada (A) é amplamente utilizada na produção de mudas devido à sua boa estrutura física, elevada porosidade e resistência à decomposição, contribuindo para a aeração e estabilidade do substrato. No entanto, apresenta baixo teor de nutrientes, sendo geralmente utilizada em mistura com outros materiais.

A palha de arroz carbonizada (B) destaca-se por sua elevada macroporosidade, favorecendo a drenagem e prevenindo a compactação do substrato. Trata-se de um material leve, estável e com baixa retenção de água, sendo indicado para compor misturas que necessitam de maior aeração.

O esterco bovino curtido (C) atua como importante fonte de nutrientes, especialmente nitrogênio, fósforo e potássio, além de estimular a atividade microbológica. Seu uso deve ser criterioso, garantindo adequada compostagem para evitar fitotoxicidade e contaminações.

A fibra de coco (D) apresenta baixa densidade, elevada capacidade de retenção hídrica e boa aeração, sendo um dos materiais mais versáteis na formulação de substratos. Após lavagem e maturação, torna-se um componente estável e eficiente.

A casca de café (E), quando compostada, fornece nutrientes e melhora a retenção de água, além de contribuir para a estrutura do substrato. Entretanto, seu uso requer tratamento prévio para redução de compostos fitotóxicos.

Por fim, o bagaço de cana-de-açúcar (F), após compostagem, atua como fonte de matéria orgânica estável, melhorando as propriedades físicas do substrato e promovendo liberação gradual de nutrientes.

De forma geral, a combinação desses materiais permite a formulação de substratos equilibrados, ajustando propriedades físicas, químicas e biológicas conforme as exigências das espécies e as condições de produção em viveiros florestais.

4. Aspectos microbiológicos e biológicos do substrato

A qualidade biológica dos substratos, frequentemente subestimada, desempenha papel decisivo na formação de mudas saudáveis, vigorosas e

resilientes. A presença de microrganismos benéficos no substrato contribui para a promoção do crescimento vegetal, aumento da absorção de nutrientes e maiores resistências das plantas a pragas, doenças e estresses ambientais (Camargo *et al.*, 2021).

Dentre os principais grupos de interesse, destacam-se os microrganismos promotores do crescimento de plantas (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria – PGPR), como bactérias do gênero *Azospirillum*, além dos fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), amplamente reconhecidos por sua atuação na ampliação da área de absorção radicular e na melhoria da nutrição mineral. A compostagem de resíduos orgânicos favorece a colonização por esses microrganismos benéficos, ao mesmo tempo em que reduz a presença de patógenos (Figura 8). Nesse sentido, substratos orgânicos compostados têm sido associados ao aumento da diversidade e da atividade microbiana, contribuindo para o equilíbrio biológico e para a supressão de organismos fitopatogênicos (Fontan *et al.*, 2025).

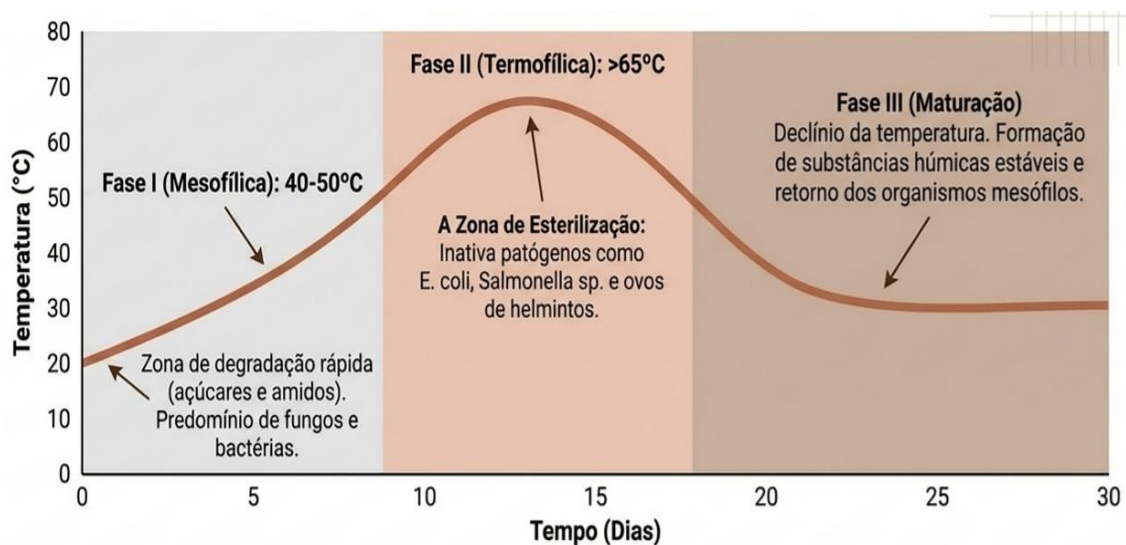


Figura 8. Atividade termofílica e liberação de calor na compostagem tradicional. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

A eficiência desse processo, entretanto, está diretamente relacionada às condições em que a compostagem é conduzida, uma vez que parâmetros como temperatura, umidade, aeração e relação C/N influenciam a dinâmica e a sucessão microbiana. Durante as fases termofílica e de maturação, ocorre a

degradação de compostos orgânicos complexos e a redução de microrganismos patogênicos, resultando em um material mais estável, seguro e biologicamente ativo (Sousa; Ceccon; Marques, 2018; Silva; Rodrigues; Lopes, 2020).

Além disso, para esses mesmos autores, a compostagem favorece a formação de substâncias húmicas, que melhoram as propriedades físicas e químicas do substrato, ao mesmo tempo em que estimulam a atividade de microrganismos benéficos. Dessa forma, o uso de compostos orgânicos bem estabilizados potencializa os efeitos positivos da microbiota e contribui para a produção de mudas mais vigorosas e adaptadas às condições de campo.

Corroborando esses aspectos, estudos indicam que substratos formulados a partir de resíduos agroindustriais apresentam maior diversidade microbiana e podem induzir mecanismos de resistência sistêmica nas plantas (Silva *et al.*, 2022). Esse fator é particularmente relevante em sistemas de restauração ecológica, nos quais as condições edáficas frequentemente são limitantes, e a microbiota exerce papel central na ciclagem de nutrientes e no estabelecimento inicial das mudas. Evidências experimentais demonstram que a incorporação de compostos orgânicos em proporções entre 30% e 40% pode maximizar o crescimento das mudas, promovendo maior desenvolvimento radicular e acúmulo de biomassa, efeitos diretamente associados à atividade microbiológica do substrato (Fontan *et al.*, 2025).

Além disso, substratos ricos em matéria orgânica favorecem a formação de agregados estáveis, melhorando a estrutura do solo, aumentando a infiltração de água e reduzindo processos erosivos. Esses efeitos são potencializados pela interação entre raízes e microrganismos simbiotes, o que reforça a importância da dimensão biológica na formulação de substratos. Dessa forma, a incorporação planejada de resíduos orgânicos contribui não apenas para o desempenho das mudas, mas também para a melhoria da qualidade do solo nas áreas restauradas (Camargo *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2022).

Nesse contexto, destaca-se que a qualidade biológica do substrato e do solo está diretamente associada à diversidade e à interação entre organismos de diferentes escalas, incluindo microrganismos (bactérias, fungos e actinomicetos), meso-organismos ou mesofauna (como ácaros e colêmbolos) e macrorganismos (como minhocas e insetos do solo) (Figura 9).

Os microrganismos atuam principalmente na decomposição da matéria orgânica e na ciclagem de nutrientes, enquanto os mesorganismos contribuem para a fragmentação dos resíduos e para a regulação das populações microbianas. Já os macrorganismos desempenham papel fundamental na estruturação física do solo, promovendo a formação de bioporos, a agregação e a melhoria da infiltração de água. A atuação integrada desses grupos biológicos favorece a construção de um solo funcional e dinâmico, essencial para o estabelecimento e desenvolvimento das mudas, especialmente em áreas em processo de restauração ecológica.



Figura 9. A biota como vetor de valor: transformação orgânica em sistemas de biorrefinaria. Fonte: Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Nesse contexto, evidências recentes indicam que a presença de rizobactérias e fungos benéficos aumentam a eficiência no uso de nutrientes e a sobrevivência das mudas após o transplante, particularmente em ambientes degradados. Esses resultados reforçam o papel estratégico da microbiota na promoção do crescimento vegetal e na estabilidade dos sistemas restaurados, destacando sua importância nos processos de restauração ecológica (Braga *et al.*, 2024).

5. Viveiros comunitários: autonomia, inovação e políticas de incentivo

O uso de resíduos orgânicos como insumos na produção de mudas configura-se como uma estratégia promissora para o fortalecimento de viveiros comunitários e de programas de restauração ecológica com enfoque social. Em diversos contextos, comunidades rurais, assentamentos agroecológicos e coletivos ambientalistas enfrentam limitações financeiras e logísticas para a aquisição de substratos comerciais, o que torna o reaproveitamento de resíduos uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente sustentável (Moura *et al.*, 2020) (Figura 10).



Figura 10. Produção coletiva de mudas em comunidades rurais. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (Google Gemini).

Além da redução de custos, essa prática contribui para o fortalecimento da autonomia produtiva dos viveiros, ao mesmo tempo em que valoriza saberes tradicionais e o uso de recursos locais. Nesse sentido, políticas públicas voltadas à restauração ecológica, como o Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg) e iniciativas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), podem incorporar o uso de substratos sustentáveis como critério de incentivo, elegibilidade ou bonificação. Tal abordagem permite articular metas ambientais à geração de trabalho e renda, promovendo modelos de restauração mais inclusivos e territorialmente integrados (Fonseca *et al.*, 2021).

Adicionalmente, a adoção de políticas que incentivem o uso de resíduos orgânicos na produção de mudas contribui para o enfrentamento de um dos principais desafios ambientais contemporâneos: a gestão adequada dos resíduos sólidos orgânicos. Essa prática está alinhada aos princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos, ao promover a valorização, reciclagem e reaproveitamento de materiais, reduzindo os impactos associados ao descarte inadequado (Santos *et al.*, 2021).

Há de se destacar a importância de iniciativas de educação ambiental e capacitação técnicas voltadas à compostagem, ao manejo de substratos e à produção de mudas. A articulação entre universidades, organizações não governamentais, órgãos públicos e comunidades locais é fundamental para a difusão dessas práticas e para a consolidação de cadeias produtivas sustentáveis (Egidio; Souza, 2025).

Nesse contexto, o uso de resíduos orgânicos na produção de mudas transcende sua dimensão técnica, configurando-se também como instrumento de transformação social e territorial (Moura *et al.*, 2020; Camargo *et al.*, 2021). Assim, a integração entre práticas agroecológicas, políticas públicas e organização social constitui um eixo estratégico para a ampliação das ações de restauração ecológica em escala local e regional (Figura 11).



Figura 11. Sinergia entre manejo de resíduos orgânicos e princípios agroecológicos. Fonte: Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

A representação apresentada na Figura 11 evidencia que a gestão integrada de resíduos orgânicos, quando orientada pelos princípios da agroecologia, potencializa não apenas a eficiência produtiva, mas também a construção de territórios mais sustentáveis e inclusivos. Nesse sentido, a articulação entre saberes locais e conhecimento técnico-científico fortalece práticas de economia circular, reduz a dependência de insumos externos e promove maior autonomia dos produtores.

Além disso, iniciativas coletivas, como associações, cooperativas e programas institucionais, ampliam a capacidade de implantação dessas práticas, favorecendo a geração de renda, a inclusão social e a conservação ambiental. Assim, o manejo adequado de resíduos orgânicos se consolida como uma estratégia multifuncional, capaz de integrar dimensões ecológicas, econômicas e sociais no contexto da restauração e do desenvolvimento sustentável.

6. Considerações

A incorporação de resíduos orgânicos na produção de mudas de espécies nativas da Mata Atlântica configura-se como uma estratégia tecnicamente consistente e alinhada aos princípios da sustentabilidade ambiental, econômica e social. Evidências da literatura científica demonstram que materiais como casca de café, fibra de coco, casca de arroz carbonizada e bagaço de cana-de-açúcar, quando devidamente processados, apresentam potencial para substituir ou complementar substratos convencionais, promovendo melhorias nas propriedades físicas, químicas e biológicas dos substratos e, consequentemente, na qualidade das mudas produzidas.

Além dos ganhos técnicos, essa abordagem contribui significativamente para a gestão sustentável de resíduos orgânicos, reduzindo a pressão sobre aterros sanitários e minimizando impactos ambientais associados ao descarte inadequado. Do ponto de vista econômico, a utilização desses materiais permite a redução dos custos de produção, ampliando o acesso a insumos por pequenos produtores e viveiros comunitários. Sob a perspectiva social, destaca-se a valorização de conhecimentos locais e o fortalecimento de iniciativas coletivas, especialmente em territórios rurais e periurbanos.

No âmbito das políticas públicas, recomenda-se que programas voltados à restauração ecológica incorporem critérios relacionados à sustentabilidade dos insumos utilizados, incentivando o uso de substratos alternativos e soluções baseadas na natureza. A integração dessa prática a instrumentos como o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e programas nacionais de restauração pode potencializar benefícios ambientais e socioeconômicos, ao mesmo tempo em que promove a transição para modelos produtivos mais circulares e de baixo impacto.

Do ponto de vista científico e tecnológico, torna-se fundamental o desenvolvimento de estudos experimentais que avaliem diferentes combinações de resíduos orgânicos, considerando variáveis como proporções ideais, estabilidade do material, dinâmica de liberação de nutrientes e interação com a microbiota do substrato. Também se destaca a necessidade de investigações voltadas ao desempenho das mudas em campo, incluindo taxas de sobrevivência, crescimento inicial e adaptação a condições edáficas adversas, aspectos ainda pouco explorados em estudos de longo prazo.

A variabilidade regional na disponibilidade e composição dos resíduos orgânicos constitui outro fator relevante, exigindo abordagens territorializadas. Estados com forte base agroindustrial, como o Espírito Santo, apresentam ampla diversidade de materiais com potencial de uso, o que reforça a importância da elaboração de protocolos técnicos regionais. Tais protocolos devem contemplar critérios padronizados de avaliação física, química e biológica dos substratos, além de diretrizes para compostagem, manejo e proporções de mistura, assegurando qualidade, eficiência produtiva e segurança agrônoma.

Adicionalmente, recomenda-se a implantação de sistemas de monitoramento e certificação da qualidade dos substratos produzidos, bem como a criação de indicadores que permitam avaliar seus impactos em termos de desempenho das mudas e sustentabilidade dos sistemas produtivos. A integração entre pesquisa científica, extensão rural e práticas locais é essencial para viabilizar a transferência de tecnologia e a adoção dessas inovações em diferentes contextos produtivos.

Por fim, a consolidação do uso de resíduos orgânicos na produção de mudas depende de uma abordagem sistêmica, que articule conhecimento

técnico, políticas públicas e engajamento social. Ao promover a circularidade de recursos, a redução de custos e a melhoria da qualidade das mudas, essa prática contribui diretamente para o fortalecimento de estratégias de restauração ecológica mais resilientes, inclusivas e adaptadas às realidades regionais, ampliando o alcance e a efetividade das ações de recomposição da Mata Atlântica.

7. Referências

ALMEIDA, R. S.; NIERI, E. M.; MONTEIRO, E. C. S.; SILVA, O. M. C.; MELO, L. A. Reaproveitamento de resíduos de café em substratos para produção de mudas de *Joannesia princeps*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 41, e201902047, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4336/2021.pfb.41e201902047>. Disponível em: <https://pfb.sede.embrapa.br/pfb/article/view/2089>. Acesso em: 15 jul. 2025.

ALONSO, J. M.; PEREIRA, R. N.; ABEL, E. L. D. Sewage sludge as substrate in *Schinus terebinthifolia* Raddi seedlings commercial production. **Scientific Reports**, v. 12, p. 17245, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21314-0>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-21314-0>. Acesso em: 16 jul. 2025.

ARRUDA, S. B.; SILVA, F. A. M.; FERRAZ, M. V.; SILVA, R. B.; BIM, O. J. B. Biossólido em substratos para produção de mudas de *Handroanthus chrysotrichus*. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 29, n. 2, p. 211-225, 2017. DOI: <https://doi.org/10.24278/2178-5031.2017.29.2.206>. Disponível em: <https://rif.emnuvens.com.br/revista/issue/view/5>. Acesso em: 15 jul. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020**. Dispõe sobre critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólidos em solos e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, n. 161, p. 265–269, 21 ago. 2020. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/index.php?id=726&option=com_sisconama&view=attonormativo. Acesso em: 6 abr. 2026.

CAMARGO, M. F.; SILVA, L. P.; RIBEIRO, W. S. et al. Atividade microbiológica em substratos compostos por resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 45, e0210090, 2021. DOI: https://doi.org/10.36783/18069657_rbcS20210090.

CHAZDON, R. L.; LINDENMAYER, D.; GUARIGUATA, M. R.; CROUZEILLES, R.; BENAYAS, J. M. R.; CHAVERO, E. L. Fostering natural forest regeneration on former agricultural land through economic and policy interventions. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 4, 043002, 2020.

DI FILIPPO, L. D. et al. A receptor-mediated landscape of druggable and targeted nanomaterials for gliomas. **Materials Today Bio**, v. 20, p. 100671, 2023.

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.

FARIA, J. C. T.; PINTO, V. M. O.; GONÇALVES, D. S.; SOUZA, D. M. S. C.; FERNANDES, S. B.; BRONDANI, G. E. A compostagem da casca de café carbonizada favorece a produção de mudas de ingá. *Nativa, Sinop*, v. 8, n. 2, p. 224–230, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v8i2.9119>. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/9119>. Acesso em: 15 jul. 2025.

FERREIRA, D. A.; SOUZA, M. V.; OLIVEIRA, J. H. R.; FREITAS, L. M. Parâmetros morfológicos e fisiológicos na avaliação da qualidade de mudas florestais. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 47, n. 124, p. 719–728, 2019.

FONSECA, T. L.; FERNANDES, G. W.; CAMPOS-FILHO, E. M.; SOARES, D. C. Políticas públicas e restauração ecológica no Brasil. *Cadernos de Agroecologia*, Brasília, v. 16, n. 2, 2021.

FONTAN, I. C. I.; CASTRO, F. M.; CARVALHO, G. W. A.; HERCULANO, A. C. O.; GOMES, M. T. C. Composto orgânico no substrato de mudas de interesse na restauração florestal da Mata Atlântica. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 18, e14167, 2025. DOI: 10.17765/2176-9168.2025v18e14167. Disponível em: <https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/14167>. Acesso em: 16 abr. 2026.

FRAGOSO, R. O.; STUEPP, C. A.; CARPANEZZI, A. A.; WENDLING, I.; ZUFFELLATO-RIBAS, K. C.; KOEHLER, H. S. Substratos renováveis na produção de mudas de *Ficus enormis* proveniente de jardim clonal. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 36, n. 88, p. 537–541, 2016. DOI: 10.4336/2016.pfb.36.88.1246. Disponível em: <https://pfb.sede.embrapa.br/pfb/article/view/1246>. Acesso em: 20 mar. 2026.

LOPES, E. D.; AMARAL, C. L. F.; NOVAES, A. B. Parâmetros morfofisiológicos na avaliação da qualidade de mudas de três espécies florestais. *Revista Agrogeoambiental*, v. 8, n. 3, 2015. DOI: 10.18406/2316-1817v8n32016834. Disponível em: <https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/834>. Acesso em: 15 jul. 2025.

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. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.21664/2238-8869.2026v15i1.8364>.

MOURA, R.; SILVA, C. O.; REZENDE, A. C.; FERREIRA, M. A. Uso de resíduos orgânicos e políticas públicas de incentivo à restauração. **Sustentabilidade em Debate**, Brasília, v. 11, n. 1, p. 160-174, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v11n1.2020.26350>.

REZENDE, C. L. *et al.* From hotspot to hopespot: an opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 16, n. 4, p. 208–214, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2018.10.002>.

ROSA, R.; MARTINS, L. D.; SANTOS, F. N.; OLIVEIRA, R. S. Aplicação de fibra de coco como substrato na produção de mudas de espécies nativas. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 2, p. 199–206, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0102-053620230216>.

SILVA, C. F.; ALVES, P. H. S.; CORRÊA, R. S. Fungos micorrízicos arbusculares em mudas florestais produzidas com diferentes substratos. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 65, n. 2, e20210436, 2022. DOI: <https://doi.org/10.22491/rca.2022.v65.2.196492>.

SILVA, M. C.; RODRIGUES, A. S.; LOPES, J. C. Dinâmica das fases térmica e de maturação na compostagem de resíduos orgânicos: uma revisão técnica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 55, e01234, p. 1-12, jan. 2020.

SILVA, O. M. C.; HERNÁNDEZ, M. M.; ARAUJO, G. C. R.; CUNHA, F. L.; EVANGELISTA, D. V. P.; LELES, P. S. S.; MELO, L. A. Potencial uso da casca de café como constituinte de substrato para produção de mudas de espécies florestais. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 4, p. 1161–1175, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509842500>.

SILVA, R. M.; CABRAL, J. M. S.; AQUINO, A. F.; SILVA, J. E. S.; SILVA, T. F. Substratos para produção de mudas de plantas de espécies nativas, hortaliças e suculentas. **Revista Contemporânea**, v. 5, n. 4, e7886, 2025. DOI: [10.56083/RCV5N4-041](https://doi.org/10.56083/RCV5N4-041).

SOUSA, G. G.; CECCON, P. R.; MARQUES, P. A. A. Composição e fases do processo de compostagem de resíduos agroindustriais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 4, p. 250-256, 2018.

SOUZA, L. F.; ALMEIDA, R. S.; SANTOS, A. P. Utilização da casca de café na produção de mudas nativas da Mata Atlântica. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 28, n. 4, e20190235, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2019-0235>.

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

CAPÍTULO 6

Potencial de óleos essenciais no controle de *Colletotrichum* em pós-colheita

Naianni de Sillis Rezende, Sara de Oliveira Olimpio, Rony Mendes Rodrigues, Ana Terra Bravim dos Santos, Willian Moreira da Costa, Atanásio Alves do Amaral, Maurício Novaes Souza

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-45-9.c6>

Resumo

A antracnose, causada por fungos do gênero *Colletotrichum*, constitui uma das principais doenças de pós-colheita em diversas culturas tropicais, provocando expressivas perdas econômicas. Diante das crescentes restrições ao uso de fungicidas sintéticos, alternativas sustentáveis baseadas na bioeconomia e nos princípios da agroecologia têm ganhado destaque no manejo fitossanitário. Nesse contexto, óleos essenciais e extratos vegetais vêm sendo amplamente investigados por sua ação fungitóxica e composição bioativa. O óleo de capim-santo (*Cymbopogon citratus*), rico em citral, demonstrou elevada eficiência no controle da antracnose em maracujá e mamão, tanto *in vitro* quanto *in vivo*, superando fungicidas em baixas concentrações. O alecrim-pimenta (*Lippia sidoides*), com timol, e a alfavaca-cravo (*Ocimum gratissimum*), com eugenol, também apresentaram resultados promissores. Extratos cítricos e óleo de alho (*Allium sativum*) destacaram-se no controle em banana, enquanto menta (*Mentha piperita*) e árvore-do-chá (*Melaleuca alternifolia*) foram eficazes em mamão. Contudo, a eficácia varia conforme a dose, o hospedeiro e as condições experimentais, além de limitações como fitotoxicidade. Assim, tais alternativas representam estratégias promissoras, desde que integradas a práticas sustentáveis para garantir qualidade e segurança na produção.

Palavras-chave: Bioeconomia. Extratos vegetais. Compostos bioativos. Fitopatologia. Pós-colheita.

1. Introdução

A fruticultura, setor em constante expansão no Brasil e no mundo, enfrenta desafios relevantes relacionados às doenças de pós-colheita, que comprometem a qualidade, a aparência e a vida útil dos frutos, restringindo sua competitividade nos mercados interno e externo (Corrêa *et al.*, 2023). Dentre as principais enfermidades, destaca-se a antracnose, causada por fungos do gênero *Colletotrichum*, especialmente as espécies *Colletotrichum gloeosporioides* e *Colletotrichum musae*. Essa doença é considerada uma das mais importantes em frutas tropicais, como maracujá, manga, mamão e banana (Aquino *et al.*, 2012; Cruz *et al.*, 2013; Araújo Neto *et al.*, 2014; Andrade; Vieira, 2016; Oliveira; Viana; Martins, 2016).

Os sintomas da antracnose caracterizam-se por lesões escuras e deprimidas na superfície dos frutos, que podem coalescer e atingir a polpa em estágios avançados, ocasionando perdas expressivas (Figura 1). No Brasil, essas perdas podem alcançar até 40% da produção na fase pós-colheita (Aquino *et al.*, 2012). Além disso, o patógeno pode permanecer em estado latente em frutos ainda imaturos, manifestando-se apenas durante o amadurecimento, quando as condições ambientais se tornam favoráveis (Cruz *et al.*, 2013).



Figura 1. Lesões características causadas pelo fungo *Colletotrichum gloeosporioides* em mangas (*Mangifera indica* L.). Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (Google Gemini).

Tradicionalmente, de acordo com esses mesmos autores, o controle da antracnose baseia-se no uso de fungicidas sintéticos. Contudo, a crescente preocupação com a segurança alimentar, a presença de resíduos químicos nos alimentos, a resistência de patógenos e os impactos e externalidades ambientais negativos, têm impulsionado a busca por alternativas sustentáveis. Nesse cenário, os óleos essenciais e extratos vegetais emergem como alternativas promissoras, devido às suas propriedades antimicrobianas, biodegradabilidade e menor toxicidade, sendo compatíveis com sistemas de produção mais sustentáveis (Figura 2).



Figura 2. A OCDE e a ONU advertem: a transição para sistemas alimentares sustentáveis e biorracionais é o caminho imperativo para garantir a segurança alimentar global. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Sob a perspectiva da bioeconomia, o uso de óleos essenciais no controle de fitopatógenos representa uma estratégia inovadora que valoriza recursos biológicos renováveis e promove a agregação de valor à biodiversidade. A bioeconomia baseia-se na utilização sustentável de recursos naturais para a geração de produtos, processos e serviços, reduzindo a dependência de insumos sintéticos e fósseis (OECD, 2009; EMBRAPA, 2018).

Nesse contexto, a exploração de compostos bioativos de plantas aromáticas e medicinais pode impulsionar cadeias produtivas locais, fomentar a

inovação tecnológica e contribuir para o desenvolvimento rural sustentável, especialmente em regiões tropicais ricas em biodiversidade (Figura 3).

	Abordagem Sintética Tradicional ⚠	Nanobiotecnologia de OEs 🌱
Mecanismo de Ação	🔦 <u>Alvo único</u> , alta taxa de resistência.	⬆️ <u>Ação sinérgica e complexa celular</u> , resistência quase nula.
Impacto Ambiental	<u>Acúmulo tóxico</u> , dano a organismos não-alvo.	⬆️ <u>Totalmente biodegradável</u> , origem botânica renovável.
Segurança Alimentar	<u>Risco grave de resíduos</u> em alimentos.	⬆️ <u>Alta segurança</u> , compostos food-grade.
Versatilidade	<u>Uso isolado</u> e altamente específico.	⬆️ <u>Amplo espectro</u> : fungicida, bactericida, anestésico.

Figura 3. Sistematização das diferenças entre a abordagem sintética tradicional e o uso da nanobiotecnologia⁹ no desenvolvimento de produtos à base de OEs. Fonte: Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Do ponto de vista agroecológico e ambiental, a substituição de insumos químicos por alternativas naturais, como óleos essenciais, está alinhada aos princípios da agroecologia, que preconiza sistemas produtivos mais equilibrados, resilientes e integrados ao meio ambiente (Altieri, 2012; Gliessman, 2015). Essa abordagem contribui para a redução da contaminação do solo, da água e dos alimentos, além de preservar a biodiversidade funcional e promover serviços ecossistêmicos essenciais (Souza, 2025). Dessa forma, o uso de produtos naturais no manejo de doenças pós-colheita não apenas reduz impactos ambientais, mas também fortalece sistemas agrícolas mais sustentáveis e socialmente justos.

2. Fungos do gênero *Colletotrichum* em diferentes hospedeiros

Os fungos do gênero *Colletotrichum* estão entre os principais agentes fitopatogênicos associados a doenças em espécies agrícolas de importância econômica mundial. Esses microrganismos são responsáveis principalmente pela antracnose, enfermidade que afeta frutos, folhas, ramos e flores, causando

⁹ É a interseção entre [nanotecnologia](#) e biotecnologia, focada na manipulação da matéria em escala atômica/molecular (1 a 100 nanômetros) para criar materiais e dispositivos com aplicações biológicas.

lesões necróticas que reduzem a produtividade e comprometem a qualidade comercial dos produtos agrícolas. Segundo Cannon *et al.* (2012), espécies desse gênero apresentam ampla distribuição geográfica e elevada capacidade de adaptação, infectando numerosos hospedeiros em ambientes tropicais e subtropicais.

Em frutíferas tropicais, como manga, mamão, banana e maracujá, *Colletotrichum* constitui um dos principais problemas fitossanitários da fase pós-colheita. Em manga, *Colletotrichum gloeosporioides* é frequentemente relatado como o principal agente da antracnose, provocando manchas escuras e deprimidas que evoluem rapidamente durante o amadurecimento dos frutos (Araújo *et al.*, 2014).

Em banana, *Colletotrichum musae* é a espécie mais associada à deterioração pós-colheita, causando perdas significativas durante o armazenamento e transporte (Cruz *et al.*, 2013). No mamoeiro, a doença reduz a vida útil dos frutos e afeta diretamente a comercialização em mercados exigentes (Andrade; Vieira, 2016) (Figura 4).



Figura 4. Relevância global do gênero *Colletotrichum*: o oitavo maior agente causal de doenças em frutos no mundo. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Além das frutíferas, espécies de *Colletotrichum* também afetam culturas anuais e hortaliças. Em pimentão, tomate e feijão, por exemplo, o patógeno pode causar lesões em frutos e sementes, favorecendo a redução do vigor das plantas

e a disseminação da doença entre áreas cultivadas. Dean *et al.* (2012) destacam que a interação entre o patógeno e o hospedeiro envolve mecanismos complexos de infecção, nos quais o fungo pode permanecer em estado quiescente até que condições favoráveis permitam o desenvolvimento dos sintomas. Essa característica torna o manejo mais difícil, especialmente em sistemas intensivos de produção.

A especificidade entre espécies de *Colletotrichum* e seus hospedeiros tem sido amplamente estudada devido à grande variabilidade genética observada no gênero. De acordo com Weir *et al.* (2012), avanços em técnicas moleculares permitiram identificar complexos de espécies antes agrupadas sob o nome de *C. gloeosporioides*, revelando diferenças importantes quanto à patogenicidade e à preferência por determinados hospedeiros. Esse conhecimento é essencial para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficientes, considerando a relação específica entre fungo e planta infectada (Figura 5).

Óleo Essencial	CIM (Concentração Inibitória Mínima)	Tempo para Aniquilação
Óleo de Nim	6,25%	30 minutos
Óleo de Melaleuca	0,80%	40 minutos
Óleo de Capim-Limão	3,20%	40 minutos
Óleo de Copaíba	25,00%	40 minutos



O Nim atinge **100% de letalidade fúngica** na **metade do tempo** dos concorrentes químicos, enquanto a **Melaleuca** exige **doses microscópicas (0,80%)** devido ao seu alto teor de terpinen-4-ol.

Figura 5. Controle *in vitro* do patógeno *C. gloeosporioides*. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

As condições ambientais também exercem forte influência sobre o desenvolvimento da doença em diferentes hospedeiros. Temperaturas elevadas e alta umidade relativa favorecem a germinação dos conídios e a penetração do fungo nos tecidos vegetais, tornando regiões tropicais particularmente suscetíveis à ocorrência da antracnose (Bailey; Jeger, 1992; Amorim; Rezende; Bergamin Filho, 2016). Além disso, ferimentos mecânicos nos frutos durante a

colheita e o transporte podem aumentar a incidência da infecção, intensificando os prejuízos econômicos.

Diante da ampla gama de hospedeiros e da importância econômica das doenças causadas por *Colletotrichum*, torna-se fundamental compreender sua diversidade biológica e epidemiológica. O conhecimento das interações entre patógeno, hospedeiro e ambiente contribui para o desenvolvimento de estratégias de controle mais sustentáveis, reduzindo perdas e promovendo maior segurança na produção agrícola. Nesse contexto, estudos voltados à identificação precisa das espécies e ao uso de alternativas menos agressivas ao meio ambiente têm recebido crescente atenção da comunidade científica (Figura 6).



Figura 6. Acordo Mercosul-UE: fim das tarifas e o desafio das barreiras sanitárias. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

3. Óleos essenciais

Os óleos essenciais são misturas complexas de compostos orgânicos voláteis, produzidos pelo metabolismo secundário de plantas, e apresentam ampla diversidade de atividades biológicas, incluindo ações fungitóxicas e fungistáticas¹⁰ (Aquino *et al.*, 2012). Esses metabólitos, formados principalmente por terpenos, terpenoides e fenóis, têm sido amplamente estudados como alternativas no controle de fitopatógenos, especialmente em sistemas que

¹⁰ São agentes (químicos, medicamentos ou defensivos agrícolas) que inibem temporariamente o crescimento e a reprodução dos fungos, sem eliminá-los completamente.

buscam reduzir o uso de insumos sintéticos. Nesse contexto, diversos trabalhos têm demonstrado a eficiência desses compostos no controle de patógenos de pós-colheita, incluindo fungos do gênero *Colletotrichum*, em diferentes culturas frutíferas (Cannon *et al.*, 2012; Cruz *et al.*, 2013).

A eficácia dos óleos essenciais no controle de patógenos está diretamente relacionada à sua composição química, que pode variar significativamente em função de fatores como condições edafoclimáticas, estágio fenológico da planta, variabilidade genética e método de extração (Burt, 2004; Aquino *et al.*, 2012). Compostos majoritários como citral, timol e eugenol são frequentemente associados à atividade antifúngica, atuando na desestabilização da membrana celular dos microrganismos e na inibição de processos metabólicos essenciais (Burt, 2004; Bakkali *et al.*, 2008). Essa variabilidade química influencia diretamente a eficácia dos óleos, exigindo padronização para seu uso em escala comercial.

Além disso, estudos indicam que a ação dos óleos essenciais pode variar conforme o hospedeiro e o patógeno, bem como entre condições experimentais *in vitro* e *in vivo*. Em muitos casos, observa-se maior eficiência em condições laboratoriais, enquanto fatores como interação com o tecido vegetal, volatilização e degradação podem reduzir a eficácia em aplicações práticas (Cruz *et al.*, 2013; Andrade; Vieira, 2016). Ainda assim, os resultados obtidos são promissores, especialmente quando os óleos são utilizados em concentrações adequadas ou associados a outras estratégias de manejo.

Outro aspecto relevante refere-se ao modo de ação desses compostos, que envolve múltiplos mecanismos, dificultando o desenvolvimento de resistência por parte dos patógenos. De acordo com Bakkali *et al.* (2008), os óleos essenciais podem atuar simultaneamente na permeabilidade da membrana celular, na inibição enzimática e na interferência em processos fisiológicos do fungo. Essa característica os torna particularmente interessantes no contexto do manejo integrado de doenças, contribuindo para sistemas de produção mais resilientes (Figura 6).

Dessa forma, considerando a variabilidade química, os mecanismos de ação e a influência de fatores ambientais, torna-se evidente que o uso de óleos essenciais no controle de fungos fitopatogênicos requer abordagens integradas

e bem fundamentadas. Assim, dando continuidade à discussão apresentada, serão detalhados, a seguir, resultados de pesquisas envolvendo diferentes óleos essenciais no controle de espécies de *Colletotrichum* em distintos hospedeiros, evidenciando seu potencial e suas limitações em condições experimentais e aplicadas.

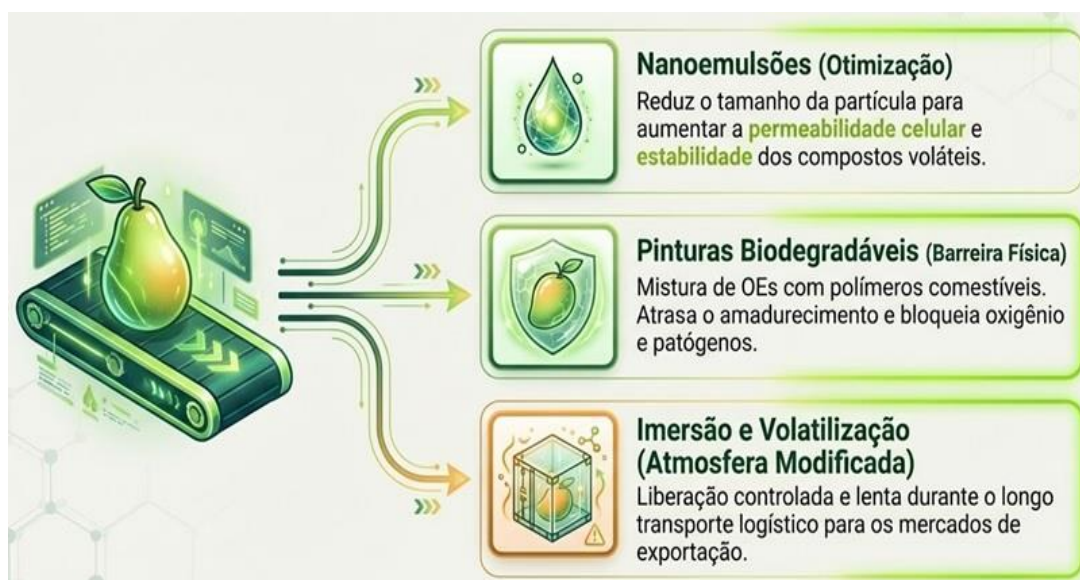


Figura 7. Arquitetura de sistemas de aplicação de óleos essenciais na logística pós-colheita de frutos. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

✚ Diferenças entre óleos essenciais e extratos vegetais

Óleos essenciais e extratos vegetais, embora frequentemente tratados como sinônimos, apresentam diferenças marcantes quanto à origem, composição química, método de obtenção e modo de ação. Os óleos essenciais correspondem a frações voláteis extraídas, em geral, por destilação por arraste a vapor ou prensagem, sendo constituídos predominantemente por compostos de baixa massa molecular, como monoterpenos, sesquiterpenos e fenóis (Burt, 2004; Bakkali *et al.*, 2008; Dhifi, 2016; Raveau *et al.*, 2020).

Entre esses compostos, destacam-se substâncias como citral, timol e eugenol, amplamente reconhecidas por sua elevada atividade antifúngica. Devido à sua natureza hidrofóbica e à alta concentração de princípios ativos, os óleos essenciais tendem a apresentar ação rápida e intensa sobre microrganismos, incluindo fungos fitopatogênicos do gênero *Colletotrichum*

(Burt, 2004; Bakkali *et al.*, 2008). No entanto, sua elevada volatilidade e sensibilidade a fatores ambientais podem limitar sua persistência e eficácia em condições de campo (Hyltdgaard; Mygind; Meyer, 2012; Dhifi, 2016; Raveau *et al.*, 2020).

Por outro lado, os extratos vegetais são obtidos a partir do uso de solventes, como água, etanol ou outros compostos orgânicos, permitindo a extração de uma gama mais ampla de metabólitos secundários. Diferentemente dos óleos essenciais, os extratos incluem tanto compostos voláteis quanto não voláteis, como flavonoides, taninos, alcaloides e outros fenólicos, o que confere a esses produtos uma ação biológica mais diversificada (Pattnaik *et al.*, 1996; Dhifi, 2016; Raveau *et al.*, 2020).

Embora, em geral, apresentem menor concentração de compostos antifúngicos específicos quando comparados aos óleos essenciais, os extratos vegetais tendem a ser mais estáveis e, em muitos casos, menos fitotóxicos, o que pode favorecer sua aplicação prática em sistemas agrícolas (Nguefack *et al.*, 2004; Raveau *et al.*, 2020).

No contexto do controle da antracnose, causada por espécies de *Colletotrichum*, os óleos essenciais frequentemente demonstram maior eficiência em ensaios *in vitro*, devido à sua capacidade de desestabilizar membranas celulares e interferir em processos metabólicos fundamentais dos fungos (Bakkali *et al.*, 2008). Por outro lado, os extratos vegetais, apesar de apresentarem ação geralmente menos intensa, podem oferecer vantagens em condições *in vivo*, como maior persistência, menor volatilização e menor risco de danos aos tecidos vegetais (Hyltdgaard; Mygind; Meyer, 2012). Dessa forma, a escolha entre óleos essenciais e extratos vegetais deve considerar não apenas a eficácia antifúngica, mas também aspectos como estabilidade, segurança, custo e viabilidade de aplicação.

Assim, do ponto de vista técnico e científico, a distinção entre esses dois tipos de produtos é fundamental para a adequada interpretação dos resultados experimentais e para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficientes e sustentáveis. A integração de ambos, associada a outras práticas de manejo, pode representar uma abordagem promissora no controle de doenças pós-colheita, contribuindo para a redução do uso de fungicidas sintéticos e para

a promoção de sistemas agrícolas mais alinhados aos princípios da sustentabilidade e da agroecologia.

A seguir, são apresentados exemplos de óleos essenciais amplamente investigados na literatura científica, evidenciando resultados consistentes e um potencial promissor no controle de fitopatógenos. Esses estudos destacam não apenas a eficácia biológica dessas substâncias, mas também sua relevância como alternativas sustentáveis no manejo fitossanitário.

3.1. Capim-santo (*Cymbopogon citratus*)

Este óleo apresenta o citral (77,74%) como componente majoritário, composto pelos isômeros E-citral (43,69%) e Z-citral (34,05%), além do β -mirceno (15,11%). Em frutos de maracujá, o óleo de *C. citratus* proporcionou o menor diâmetro das lesões de antracnose até a concentração de $6 \mu\text{L mL}^{-1}$. Na concentração de $8 \mu\text{L mL}^{-1}$, esse óleo, assim como os de alecrim-pimenta e alfavaca-cravo, inibiu completamente o desenvolvimento do fungo *Colletotrichum gloeosporioides* (Aquino *et al.*, 2012) (Figura 8).



Figura 8. Capim-santo (*Cymbopogon citratus*). Fonte: Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

De acordo com Aquino *et al.* (2012), estudos anteriores indicam que o óleo de *C. citratus* foi tão eficiente quanto o fungicida Imidazole® em baixas

concentrações (0,12 e 0,25 mg L⁻¹) no controle de *C. gloeosporioides* em maracujá, sem causar distúrbios fisiológicos. Observou-se também que esse óleo reduziu a área lesionada e a severidade da doença em mamão, evidenciando sua eficácia no controle pós-colheita.

Apesar dos resultados promissores, um estudo com mamoeiro indicou baixa eficiência do óleo de capim-limão na inibição da germinação de conídios de *C. gloeosporioides*, possivelmente devido à sua elevada volatilidade. No entanto, em concentrações entre 10 e 100 µL, o óleo apresentou efeito fungistático significativo, reduzindo o desenvolvimento do patógeno (Andrade; Vieira, 2016).

3.2. Alecrim-pimenta (*Lippia sidoides*)

O timol (30,24%) é o componente majoritário do óleo de *L. sidoides*, acompanhado por benzeno (14,49%), trans-β-cariofileno (11,82%), borneol (11,38%) e metil-timol éter (8,32%). Em maracujá, na concentração de 8 µL mL⁻¹, o óleo de *L. sidoides* inibiu completamente o desenvolvimento de *Colletotrichum gloeosporioides* (Aquino *et al.*, 2012) (Figura 9).



Figura 9. Alecrim-pimenta (*Lippia sidoides*). Fonte: Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (Google Gemini).

Estudos *in vitro* com banana demonstraram que extratos e óleos essenciais de *Lippia sidoides* foram altamente eficazes, inibindo 100% do crescimento do patógeno *Colletotrichum musae*, com desempenho semelhante ao controle químico. No entanto, em ensaios *in vivo* em banana, o óleo de alecrim-pimenta apresentou apenas 30% de inibição no desenvolvimento das lesões, sendo considerado menos eficiente quando comparado ao controle químico (Oliveira; Viana; Martins, 2016).

A atividade fungitóxica desse óleo também foi relatada contra outros fitopatógenos, como *Botrytis cinerea*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus flavus* e espécies do gênero *Fusarium*, evidenciando seu amplo espectro de ação antifúngica (Andrade; Vieira, 2016). Esses resultados sugerem que a eficácia observada *in vitro* nem sempre se traduz diretamente em condições de campo, possivelmente devido a fatores como volatilização, degradação dos compostos ativos e interação com variáveis ambientais.

Além disso, aspectos como concentração, forma de aplicação e estágio de desenvolvimento do patógeno podem influenciar significativamente os resultados *in vivo*. A composição química do óleo essencial, frequentemente variável em função das condições edafoclimáticas e do manejo da planta, também pode impactar sua atividade biológica. Nesse sentido, estudos adicionais são necessários para otimizar formulações e estratégias de aplicação, visando aumentar a persistência e a eficiência desses compostos em condições reais de cultivo. Dessa forma, os óleos essenciais despontam como alternativas promissoras, especialmente quando integrados a outras práticas de manejo sustentável no controle de doenças de plantas.

3.3. Alfavaca-cravo (*Ocimum gratissimum*)

Este óleo destaca-se pelo elevado teor de eugenol (92,89%) como componente majoritário, seguido pelo β -bisaboleno (5,92%). De forma semelhante a outros óleos essenciais, na concentração de 8 $\mu\text{L mL}^{-1}$, o óleo de *O. gratissimum* inibiu completamente o desenvolvimento de *Colletotrichum gloeosporioides* em maracujá. O eugenol também demonstrou elevada eficácia na redução de patógenos de pós-colheita em frutos como maçãs e ameixas,

evidenciando seu potencial como agente antifúngico natural (Aquino *et al.*, 2012) (Figura 10).



Figura 10. Alfavaca-cravo (*Ocimum gratissimum*). Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (Google Gemini).

A atividade fungitóxica desse óleo foi igualmente confirmada em ensaios *in vitro* contra *C. gloeosporioides*, reforçando sua eficiência no controle de fitopatógenos associados à antracnose (Oliveira; Viana; Martins, 2016).

3.4. Óleo de copaíba (*Copaifera* spp.)

O óleo de copaíba é constituído predominantemente por sesquiterpenos, como o β -cariofileno, associado à atividade antifúngica, e por diterpenos, cuja presença no óleo-resina pode promover efeito sinérgico com os sesquiterpenos. Esse óleo apresenta reconhecida eficácia no controle de diferentes espécies fúngicas, incluindo *Colletotrichum gloeosporioides*. Em ensaios *in vitro*, tanto o óleo essencial quanto o óleo-resina de copaíba inibiram o crescimento do patógeno. O óleo-resina mostrou maior eficiência, reduzindo a área da colônia em 97,1% na concentração de $1,5 \text{ mL L}^{-1}$, enquanto o óleo essencial promoveu redução de 88,9% na concentração de $2,0 \text{ mL L}^{-1}$ (Figura 11).



Figura 11. Óleo de copaíba (*Copaifera* spp.). Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (Google Gemini).

Entretanto, em condições *in vivo*, em frutos de maracujá, o óleo essencial de copaíba, nas concentrações entre 0,25 e 1,0 mL L⁻¹, não apresentou eficácia significativa no controle da severidade da antracnose nem na redução do número de lesões. Adicionalmente, o uso do óleo-resina pode causar oleosidade superficial e odor desagradável nos frutos, comprometendo sua qualidade comercial (Araújo *et al.*, 2014).

3.5. Cravo-da-índia (*Syzygium aromaticum*)

Os principais constituintes do cravo-da-índia são o eugenol e o β -cariofileno, compostos amplamente reconhecidos por sua ação antimicrobiana (Oliveira; Viana; Martins, 2016). Em banana, a aplicação de emulsão do óleo essencial de *S. aromaticum* resultou em menor severidade da doença e maior eficiência no controle da antracnose quando comparada ao tratamento controle (Cruz *et al.*, 2013).

Ensaios *in vitro* com *Colletotrichum musae* demonstraram que o óleo de cravo-da-índia inibiu completamente o crescimento do fungo em todas as concentrações testadas (25, 50 e 100 μ L/100 mL de BDA), apresentando desempenho equivalente ao de fungicidas sintéticos. Entretanto, em aplicações

in vivo em banana, observou-se escurecimento total da casca dos frutos, indicando efeito fitotóxico na concentração utilizada (Oliveira; Viana; Martins, 2016) (Figura 12).



Figura 12. Cravo-da-índia (*Syzygium aromaticum*): botão floral seco. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (Chat GPT).

Em estudos com manga, o óleo essencial de cravo também se mostrou eficiente na inibição do crescimento micelial de *Colletotrichum gloeosporioides*, reforçando seu potencial no controle de patógenos associados à antracnose em diferentes hospedeiros (Corrêa *et al.*, 2023).

3.6. Eucalipto (*Eucalyptus citriodora* / *Eucalyptus globulus*)

Extratos e óleos essenciais de eucalipto foram avaliados quanto ao seu potencial no controle de fungos do gênero *Colletotrichum*. Em ensaios *in vitro* com *Colletotrichum musae*, o extrato de eucalipto apresentou efeito inibitório crescente sobre o crescimento micelial, atingindo até 97% de inibição na concentração de 30% (Figura 13).

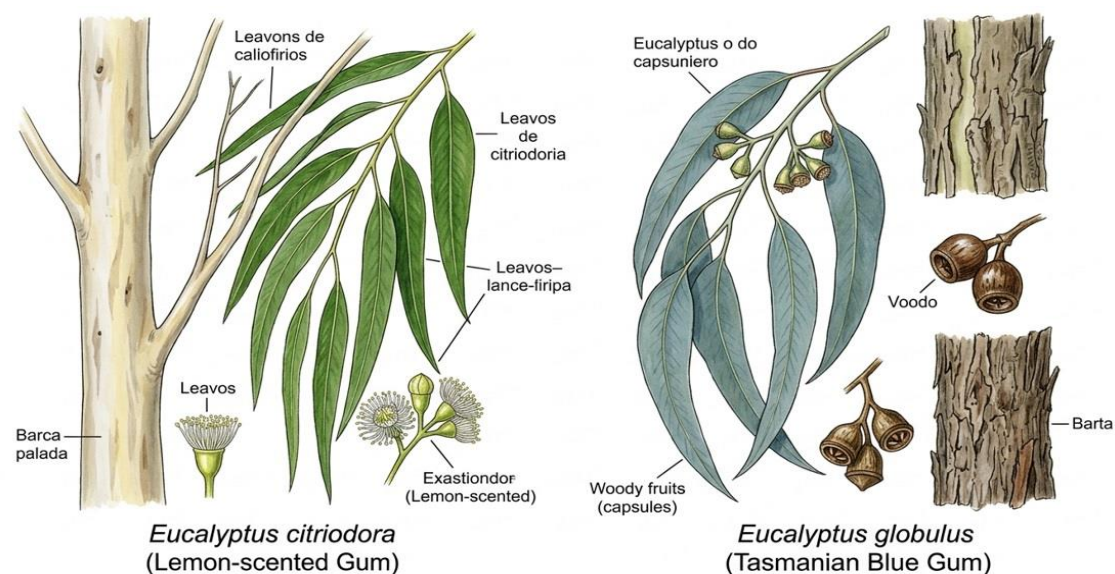


Figura 13. Eucalipto (*Eucalyptus citriodora* / *Eucalyptus globulus*). Fonte: Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (Google Gemini).

Por outro lado, o óleo essencial de eucalipto demonstrou baixo efeito inibitório em todas as concentrações testadas em condições *in vitro*. Em experimentos *in vivo* com banana, o óleo proporcionou apenas 26% de inibição no desenvolvimento da doença, sendo considerado pouco eficiente quando comparado ao controle químico (Oliveira; Viana; Martins, 2016) (Figura 14).

Esse desempenho limitado pode estar associado à composição química específica do óleo, cujos compostos majoritários podem apresentar menor atividade antifúngica frente ao patógeno avaliado. Além disso, fatores como volatilidade elevada e rápida degradação dos princípios ativos podem reduzir sua persistência na superfície dos tecidos vegetais, comprometendo sua eficácia em condições reais de cultivo. A interação com fatores ambientais, como temperatura, radiação solar e umidade, também tende a influenciar negativamente sua ação *in vivo*.

Outro aspecto relevante refere-se à possível dificuldade de penetração dos compostos ativos nas estruturas do patógeno ou nos tecidos infectados. Dessa forma, embora o óleo de eucalipto apresente propriedades biológicas reconhecidas, sua aplicação no controle de fitopatógenos específicos pode demandar ajustes em formulações, como o uso de emulsificantes ou tecnologias

de liberação controlada. Assim, seu uso isolado pode ser limitado, sendo mais promissor quando integrado a estratégias combinadas de manejo fitossanitário.



Figura 14. Eucalipto (*Eucalyptus citriodora* / *Eucalyptus globulus*): folhas, óleo essencial e madeira. Fonte: Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (Chat GPT).

3.7. Alho (*Allium sativum*)

O óleo essencial de alho apresenta uma composição complexa, contendo compostos bioativos como alicina, ajoeno, acetaldeído, citral, eugenol, geraniol e linalol, entre outros, os quais estão associados à sua reconhecida atividade antimicrobiana (Figura 15). Esses compostos atuam de forma sinérgica, interferindo em processos metabólicos essenciais dos microrganismos, como a integridade da membrana celular e a atividade enzimática. A alicina, em particular, destaca-se por sua elevada reatividade, sendo capaz de inibir o crescimento de uma ampla gama de fungos e bactérias fitopatogênicas. Além disso, o óleo de alho apresenta potencial como indutor de resistência em plantas, estimulando mecanismos de دفاع naturais. No entanto, sua eficácia pode variar em função da concentração, da forma de aplicação e das condições ambientais, o que reforça a necessidade de estudos que otimizem seu uso em sistemas produtivos sustentáveis (Cruz *et al.*, 2013).

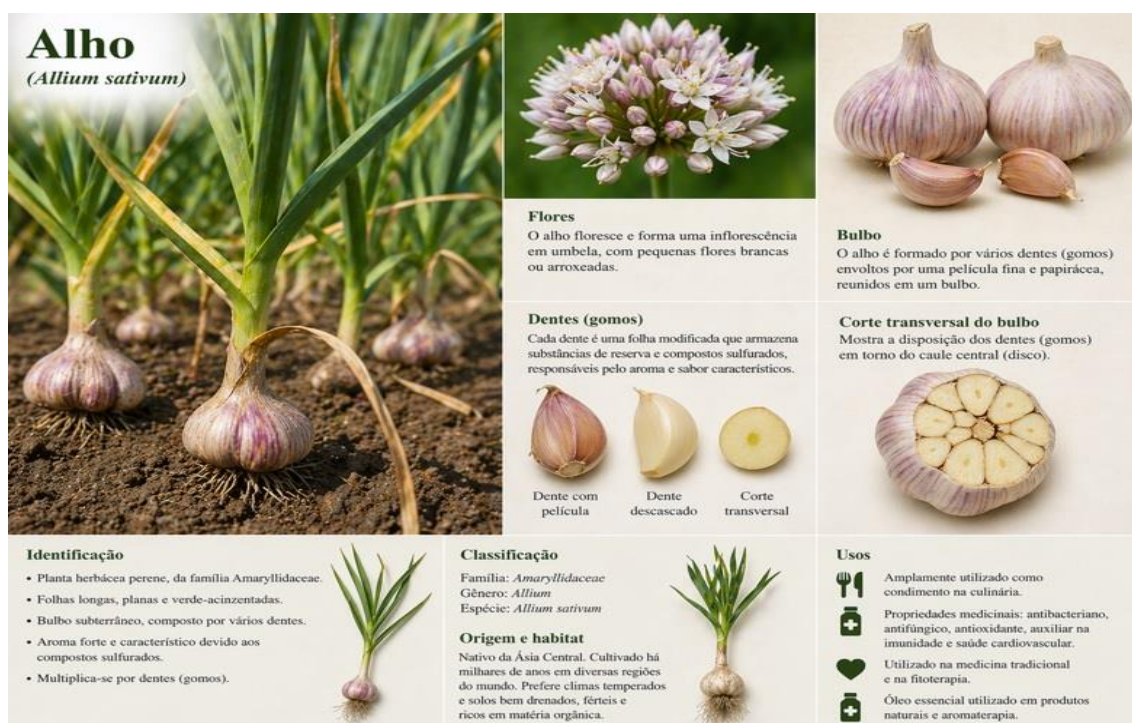


Figura 15. Alho (*Allium sativum*): bulbo (dentes), folhas e óleo essencial. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (Chat GPT).

Em banana, a imersão dos frutos em emulsão de óleo essencial de *Allium sativum* resultou na menor severidade da doença e no maior percentual de controle da antracnose, atingindo 86,27% de eficiência contra *Colletotrichum musae*, superando outros óleos essenciais avaliados (Cruz *et al.*, 2013).

De acordo com esses mesmos autores, esse elevado nível de controle evidencia o potencial do óleo de alho como alternativa eficaz no manejo pós-colheita de doenças fúngicas. Tal desempenho pode estar relacionado à alta concentração de compostos sulfurados, especialmente a alicina, que apresenta forte ação fungitóxica. Além disso, a forma de aplicação por imersão favorece maior contato entre o produto e a superfície do fruto, aumentando sua eficácia. Esses resultados reforçam a viabilidade do uso de óleos essenciais em estratégias de manejo integrado, contribuindo para a redução do uso de fungicidas sintéticos e para a adoção de práticas mais sustentáveis na cadeia produtiva da banana.

3.8. Árvore-chá (*Melaleuca alternifolia*)

Em estudos com mamoeiro, o óleo essencial de árvore-chá demonstrou forte ação sobre o desenvolvimento de *Colletotrichum gloeosporioides*, afetando significativamente a germinação de conídios. Na concentração de 100 μL , o óleo inibiu completamente o crescimento micelial do fungo, tanto em condições *in vitro* quanto *in vivo*.

Apesar desses resultados expressivos em concentrações mais elevadas, o óleo de *M. alternifolia* foi, de modo geral, classificado como de eficiência mediana quando comparado a outros óleos essenciais avaliados para o controle da antracnose (Andrade; Vieira, 2016) (Figura 16).



Figura 16. Árvore-chá (*Melaleuca alternifolia*). Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (Chat GPT).

A Figura 16 ilustra a espécie *Melaleuca alternifolia*, amplamente reconhecida pela produção de óleo essencial com propriedades antimicrobianas relevantes. No contexto fitossanitário, seus compostos bioativos, como terpinen-4-ol e cineol, desempenham papel fundamental na inibição de microrganismos, atuando sobre a permeabilidade da membrana celular e comprometendo o metabolismo fúngico. No entanto, a eficiência observada está fortemente

condicionada à concentração utilizada e à forma de aplicação, o que pode limitar sua viabilidade em condições de campo. Além disso, fatores como custo, disponibilidade e estabilidade do óleo devem ser considerados na sua adoção em escala comercial. Dessa forma, embora apresente potencial no controle de fitopatógenos, o óleo de árvore-chá tende a ser mais eficaz quando integrado a outras estratégias de manejo, compondo abordagens sustentáveis e multifatoriais no controle da antracnose (Andrade; Vieira, 2016).

3.9. Menta (*Mentha piperita*)

De forma semelhante ao óleo de árvore-chá, o óleo essencial de menta apresentou elevada eficácia no controle de *Colletotrichum gloeosporioides* em mamoeiro. Na concentração de 100 μL , observou-se inibição completa do crescimento micelial do fungo, tanto em condições *in vitro* quanto *in vivo*.

Esses resultados corroboram outros estudos que também demonstraram a alta atividade antifúngica do óleo essencial de *M. piperita* em ensaios *in vitro*, reforçando seu potencial no controle de patógenos associados à antracnose (Andrade; Vieira, 2016) (Figura 17).



Figura 17. Menta (*Mentha piperita*). Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (Chat GPT).

A Figura 17 destaca a espécie *Mentha piperita*, cujo óleo essencial é rico em compostos como mentol e mentona, amplamente associada à sua expressiva atividade antifúngica. Esses metabólitos secundários atuam diretamente na integridade das membranas celulares dos fungos, promovendo desorganização estrutural e inibição do crescimento micelial (Andrade; Vieira, 2016).

No entanto, para esses mesmos autores, assim como observado para outros óleos essenciais, a eficácia do óleo de menta pode variar em função de fatores como concentração, forma de aplicação e condições ambientais. Além disso, sua elevada volatilidade pode limitar a persistência do efeito em condições de campo. Ainda assim, seu potencial como agente de controle biológico é significativo, especialmente quando inserido em estratégias integradas de manejo fitossanitário, alinhadas aos princípios da sustentabilidade e à redução do uso de insumos químicos sintéticos.

3.10. Anis (*Pimpinella anisum*) e canela (*Cinnamomum zeylanicum*)

Em estudos com mamoeiro, os óleos essenciais de anis (*Pimpinella anisum*) e canela (*Cinnamomum zeylanicum*) apresentaram baixa eficiência na inibição da germinação de conídios de *Colletotrichum gloeosporioides* em condições *in vitro*. No entanto, em concentrações mais elevadas, ambos os óleos demonstraram efeito fungistático, contribuindo para a redução do crescimento micelial e do diâmetro das lesões em condições *in vivo* (Andrade; Vieira, 2016) (Figura 18).

Além disso, o óleo essencial de canela (*C. zeylanicum*) tem sido associado à atividade fungicida contra patógenos causadores da podridão da coroa e da antracnose em banana. Contudo, apesar de sua ação antifúngica, observou-se que frutos tratados com esse óleo apresentaram alterações indesejáveis na coloração da casca, tornando-os inadequados para consumo, o que limita sua aplicação prática (Cruz *et al.*, 2013).

Para esses mesmos autores, esses resultados evidenciam que a eficácia biológica dos óleos essenciais deve ser analisada em conjunto com seus efeitos sobre a qualidade pós-colheita dos frutos. No caso da canela, compostos como o cinamaldeído, embora altamente ativos contra microrganismos, podem

interagir com os tecidos vegetais, promovendo alterações fisiológicas e visuais. Além disso, a resposta diferenciada entre ensaios *in vitro* e *in vivo* reforça a influência de fatores ambientais e da complexidade do sistema hospedeiro-patógeno. Nesse contexto, torna-se fundamental o desenvolvimento de formulações que reduzam efeitos fitotóxicos e preservem as características comerciais dos frutos. Assim, o uso desses óleos deve ser cuidadosamente ajustado, considerando não apenas sua eficiência no controle de patógenos, mas também sua compatibilidade com a qualidade final do produto.



Figura 18. Anis (*Pimpinella anisum*) e canela (*Cinnamomum zeylanicum*). Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (Chat GPT).

A Figura 18 ilustra espécies vegetais amplamente reconhecidas pelo potencial bioativo de seus óleos essenciais, reforçando sua relevância em estudos voltados ao controle alternativo de fitopatógenos. No entanto, como discutido, a aplicação prática desses compostos exige uma análise criteriosa que vá além da eficácia antifúngica, incorporando aspectos relacionados à fitotoxicidade e à qualidade pós-colheita.

Nesse sentido, a utilização desses óleos em sistemas produtivos demanda ajustes técnicos, como a padronização de concentrações, o desenvolvimento de formulações mais estáveis e o uso de tecnologias que controlem a liberação dos compostos ativos. Além disso, a integração com outras estratégias de manejo, como o controle biológico e práticas culturais, pode potencializar seus efeitos e

reduzir impactos indesejáveis. Assim, a adoção desses insumos naturais deve ser orientada por uma abordagem sistêmica, alinhada aos princípios da sustentabilidade e à manutenção da qualidade dos produtos agrícolas.

3.11. Chá-de-moça (*Pectis brevipedunculata*)

O óleo essencial dessa espécie apresenta o citral como componente majoritário (aproximadamente 76%). Em ensaios *in vitro*, o óleo de *P. brevipedunculata* promoveu redução do crescimento micelial de *Colletotrichum gloeosporioides* de forma dose-dependente, com maior sensibilidade do fungo observada na concentração de 4 $\mu\text{L mL}^{-1}$.

No controle da antracnose em mudas de manga, o óleo de chá-de-moça reduziu a severidade da doença na cultivar Tommy Atkins, na concentração de 4 $\mu\text{L mL}^{-1}$. Entretanto, observou-se aumento da severidade na cultivar Comum, evidenciando resposta diferencial entre genótipos. Em frutos de manga, o óleo essencial de *P. brevipedunculata*, na concentração de 3 $\mu\text{L mL}^{-1}$, reduziu significativamente a severidade da doença (a partir de 54,83%) e a profundidade das lesões na polpa em todas as cultivares avaliadas (Corrêa *et al.*, 2023) (Figura 19).



Figura 19. Chá-de-moça (*Pectis brevipedunculata*). Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (Chat GPT).

A Figura 19 evidencia a espécie *Pectis brevipedunculata*, destacando seu potencial como fonte de compostos bioativos com aplicação no manejo de doenças pós-colheita. Os resultados apresentados reforçam que a eficácia do óleo essencial está diretamente relacionada não apenas à concentração utilizada, mas também à interação com o genótipo da planta hospedeira, o que pode influenciar significativamente a resposta ao tratamento.

Essa variabilidade ressalta a importância de abordagens específicas por cultivar, sobretudo em culturas comerciais como a manga. Além disso, o elevado teor de citral sugere forte atividade antifúngica, embora sua ação possa ser modulada por fatores fisiológicos do fruto e condições ambientais. Nesse contexto, o uso desse óleo essencial mostra-se promissor, especialmente quando associado a estratégias integradas de manejo, visando maior eficiência no controle da antracnose e manutenção da qualidade dos frutos.

3.12. Melosa (*Dizygostemon riparius*)

Os principais componentes do óleo essencial de *D. riparius* (popularmente, alecrim-do-brejo), são o fenchil e o acetato de fenchol (Figura 20).



Figura 20. Melosa (*Dizygostemon riparius*). Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (Chat GPT).

Até o momento, há poucos relatos na literatura sobre a utilização desse óleo no controle de fitopatógenos, o que confere caráter inovador aos estudos disponíveis. Em ensaios *in vitro*, o óleo demonstrou inibição do crescimento micelial de *Colletotrichum gloeosporioides* de forma dose-dependente.

Em mudas de manga, na concentração de 4 $\mu\text{L mL}^{-1}$, o óleo de *D. riparius* reduziu a severidade da antracnose na cultivar Tommy Atkins; contudo, de forma semelhante ao observado para o óleo de chá-de-moça, houve aumento da severidade na cultivar Comum, indicando resposta dependente do genótipo. Além disso, foi registrada elevada fitotoxicidade, caracterizada principalmente por queda acentuada de folhas, possivelmente associada à baixa polaridade e ao caráter hidrofóbico do óleo.

Apesar desses efeitos negativos em mudas, em frutos de manga, o óleo essencial de *D. riparius*, na concentração de 3 $\mu\text{L mL}^{-1}$, apresentou resultados promissores, com redução significativa da severidade da doença e da profundidade das lesões na polpa, especialmente na cultivar Tommy Atkins (Corrêa *et al.*, 2023).

3.13. Espécies promissoras no controle da antracnose

Além das espécies citadas, há outras bastante relevantes na literatura que merecem destaque, especialmente por apresentarem resultados consistentes contra fungos do gênero *Colletotrichum* e por já terem sido mais exploradas em diferentes contextos experimentais:

✓ Tomilho (*Thymus vulgaris*)

O óleo essencial de tomilho é rico em timol e carvacrol, compostos com forte atividade antifúngica. Estudos demonstram elevada eficiência na inibição do crescimento micelial de espécies do gênero *Colletotrichum*, tanto *in vitro* quanto *in vivo*, sendo frequentemente comparável a fungicidas sintéticos. Além disso, apresenta menor incidência de fitotoxicidade quando aplicado em concentrações adequadas (Burt, 2004; Bakkali *et al.*, 2008; Hyldgaard; Mygind; Meyer, 2012).

✓ **Orégano (*Origanum vulgare*)**

Semelhante ao tomilho, o óleo de orégano possui carvacrol como principal componente ativo. Trata-se de um dos óleos mais estudados quanto à atividade antifúngica, apresentando elevada eficácia contra patógenos de pós-colheita. Sua ação está relacionada à desestabilização da membrana celular dos fungos, levando à rápida inativação celular (Pattnaik *et al.*, 1996; Burt, 2004; Hyldgaard; Mygind; Meyer, 2012).

✓ **Capim-citronela (*Cymbopogon nardus*)**

Rico em citronelal, geraniol e citronelol, o óleo essencial de citronela apresenta atividade antifúngica significativa. Estudos indicam sua eficiência no controle de patógenos em frutas tropicais, incluindo fungos de importância pós-colheita. No entanto, assim como outros óleos do gênero *Cymbopogon*, sua elevada volatilidade pode limitar a persistência do efeito em condições práticas (Nguefack *et al.*, 2004; Bakkali *et al.*, 2008).

✓ **Manjerição (*Ocimum basilicum*)**

O óleo essencial de manjerição contém compostos como linalol e eugenol, responsáveis por sua atividade antifúngica. Resultados experimentais indicam potencial no controle de fungos fitopatogênicos, com destaque para sua ação sobre o crescimento micelial e a germinação de esporos. Sua eficácia é semelhante à observada em outras espécies do gênero *Ocimum*, como *O. gratissimum* (Singh *et al.*, 2005; Bakkali *et al.*, 2008).

✓ **Canela-cássia (*Cinnamomum cassia*)**

Diferentemente de *C. zeylanicum*, o óleo essencial de *C. cassia* apresenta maior concentração de cinamaldeído, composto associado à intensa atividade antifúngica. Estudos apontam resultados promissores no controle de patógenos pós-colheita, com ação sobre a integridade celular e processos metabólicos dos fungos. Contudo, sua aplicação pode ser limitada por efeitos fitotóxicos, dependendo da concentração utilizada (Burt, 2004; Bakkali *et al.*, 2008; Hyldgaard; Mygind; Meyer, 2012).

De forma geral, espécies vegetais ricas em compostos fenólicos, como timol, carvacrol e eugenol, tendem a apresentar elevada atividade antifúngica,

atuando muitas vezes de forma complementar para desestabilizar as estruturas de resistência dos patógenos (Figura 21).

Esses metabólitos secundários possuem alta capacidade de interação com lipídios e proteínas da membrana celular, promovendo aumento da permeabilidade, extravasamento de constituintes intracelulares e, conseqüentemente, a morte celular. Além disso, sua ação pode envolver a inibição de enzimas essenciais ao metabolismo fúngico e a interferência na síntese de componentes estruturais da parede celular. A atuação sinérgica entre esses compostos potencializa o efeito antifúngico, tornando-os particularmente eficazes mesmo em concentrações relativamente baixas. Outro aspecto relevante é a menor probabilidade de desenvolvimento de resistência por parte dos patógenos, em função da multiplicidade de alvos bioquímicos envolvidos. Nesse sentido, tais características reforçam o interesse científico e tecnológico no uso desses compostos como base para o desenvolvimento de bioinsumos no manejo fitossanitário sustentável (Bakkali et al., 2008; Hyldgaard; Mygind; Meyer, 2012).



Figura 21. Mecanismo de ação do escudo sinérgico na destruição da parede celular fúngica. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Nesse contexto, a inserção dos óleos essenciais na bioeconomia exige a superação de gargalos tecnológicos relacionados à volatilidade e à oxidação

prematura dos constituintes químicos. A nanobiotecnologia surge como uma ferramenta estratégica, permitindo o encapsulamento desses compostos em matrizes poliméricas ou lipídicas, o que possibilita a liberação controlada e reduz os riscos de fitotoxicidade às culturas tratadas (Dubey *et al.*, 2010). Tais inovações são fundamentais para que bioprodutos deixem de ser apenas alternativas laboratoriais e se tornem insumos competitivos no mercado de defensivos agrícolas sustentáveis, alinhando-se aos princípios de uma economia circular e regenerativa (Figura 22).

Somado aos desafios técnicos, o desenvolvimento de uma cadeia produtiva robusta para os OEs enfrenta obstáculos econômicos, como a variabilidade na composição química das plantas sob diferentes condições edafoclimáticas. Essa oscilação compromete a padronização necessária para o registro e a comercialização em larga escala (Raji *et al.*, 2017).



Figura 22. Escalonamento da aplicação de óleos essenciais: o papel da nanotecnologia na superação de barreiras biológicas e físico-químicas. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Para que a bioeconomia de óleos essenciais se consolide, é fundamental integrar o melhoramento genético de espécies aromáticas com processos de extração otimizados, garantindo um fornecimento estável de matérias-primas que atendam às rigorosas exigências de eficácia e segurança do setor agroindustrial contemporâneo (Figura 23).

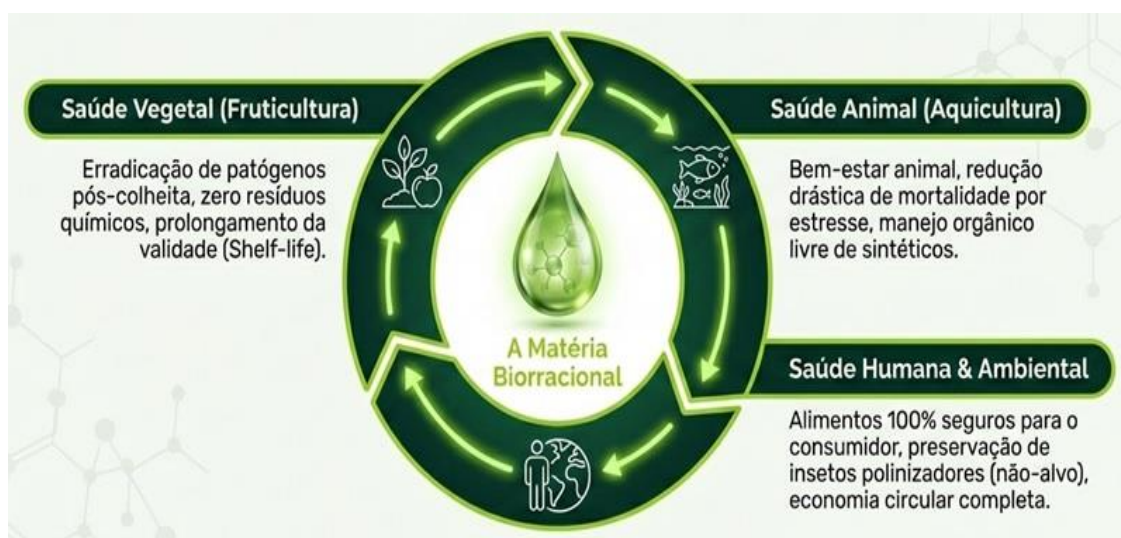


Figura 23. O ciclo contínuo da bioeconomia. Fonte: Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Essa integração sistêmica permite que o valor agregado aos óleos essenciais transcenda a simples atividade biológica, posicionando-os como ativos estratégicos no fortalecimento de cadeias produtivas locais e resilientes. Ao alinhar a padronização genética com tecnologias de processamento de baixo impacto ambiental, o setor consegue mitigar a pressão sobre os ecossistemas naturais, transformando a biodiversidade em um motor de desenvolvimento tecnológico sustentável. Assim, a consolidação desse ciclo não apenas atende à demanda por insumos verdes, mas estabelece um novo paradigma onde a eficiência produtiva caminha paralelamente com a regeneração dos serviços ecossistêmicos e a segurança jurídica necessária para investimentos de longo prazo na agroindústria (OECD, 2009; EMBRAPA, 2018).

4. Considerações

A utilização de óleos essenciais no controle da antracnose revela um cenário promissor, mas também complexo, no qual a eficácia está diretamente condicionada a múltiplos fatores interdependentes. Elementos como concentração, composição química, quimiotipo¹¹ da planta, condições

¹¹ O quimiotipo (QT) de uma planta é uma variação química dentro da mesma espécie botânica, onde plantas morfologicamente idênticas produzem componentes químicos majoritários diferentes em seus óleos essenciais, influenciados pelo solo, clima e altitude.

edafoclimáticas, método de extração, volatilidade dos compostos e forma de aplicação influenciam significativamente os resultados obtidos. Além disso, a variabilidade entre hospedeiros e patógenos, bem como as diferenças entre condições *in vitro* e *in vivo*, reforçam a necessidade de abordagens mais integradas e específicas para cada sistema produtivo.

Outro aspecto relevante diz respeito à fisiologia do fruto. O estágio de maturação exerce papel determinante na suscetibilidade à infecção, sendo frutos mais maduros geralmente mais vulneráveis ao desenvolvimento de patógenos, em função de alterações bioquímicas que favorecem o crescimento fúngico. Soma-se a isso o comportamento latente de muitos patógenos, que se estabelecem ainda no campo e se manifestam apenas na pós-colheita, o que limita a eficácia de tratamentos aplicados exclusivamente após a colheita.

A fitotoxicidade observada em alguns óleos essenciais evidencia um dos principais entraves para sua aplicação prática. Danos à casca dos frutos, alterações sensoriais e efeitos negativos em mudas indicam que a definição de doses seguras e eficientes ainda é um desafio. Nesse sentido, estratégias como microencapsulação, uso de emulsões estáveis, combinação com revestimentos comestíveis e aplicação em sistemas integrados podem contribuir para aumentar a estabilidade dos compostos e reduzir efeitos indesejáveis.

Além dos aspectos técnicos, destaca-se a importância de considerar a viabilidade econômica e operacional dessas alternativas. A padronização da composição química dos óleos, a escalabilidade da produção, o custo de extração e a regulamentação para uso comercial são fatores que precisam ser superados para que essas tecnologias possam ser adotadas em larga escala. A integração com outras práticas de manejo, como controle biológico, boas práticas de colheita e armazenamento, tende a potencializar os resultados e aumentar a segurança do sistema produtivo.

Sob a perspectiva da agroecologia, o uso de óleos essenciais representa uma estratégia alinhada à construção de sistemas agrícolas mais sustentáveis, resilientes e menos dependentes de insumos externos. Essa abordagem contribui para a redução da contaminação ambiental, preservação da biodiversidade e promoção de serviços ecossistêmicos, além de favorecer a saúde dos trabalhadores rurais e dos consumidores.

Ao valorizar recursos naturais renováveis e conhecimentos tradicionais, essa prática também dialoga com os princípios da bioeconomia, fortalecendo cadeias produtivas locais e agregando valor aos produtos agrícolas. Ademais, a utilização desses compostos pode estimular práticas produtivas mais diversificadas, integrando cultivos aromáticos e medicinais aos sistemas agrícolas, o que amplia a multifuncionalidade das propriedades rurais. Esse enfoque também favorece a autonomia dos agricultores, especialmente da agricultura familiar, ao reduzir a dependência de insumos industriais e incentivar o aproveitamento de recursos disponíveis localmente.

É fundamental ampliar os estudos que envolvam condições reais de campo e pós-colheita, explorando diferentes combinações de óleos, tecnologias de aplicação e interações com outros métodos de controle. O avanço nesse campo depende de uma abordagem interdisciplinar que integre conhecimentos da fitopatologia, química de produtos naturais, tecnologia de alimentos e ciências ambientais. Além disso, aspectos relacionados à padronização de formulações, regulamentação e viabilidade econômica precisam ser considerados para viabilizar sua adoção em escala comercial.

A avaliação dos impactos em longo prazo sobre os agroecossistemas e a saúde humana também se mostra necessária, garantindo segurança e eficácia no uso contínuo desses insumos. Dessa forma, será possível consolidar o uso de óleos essenciais como uma alternativa viável, segura e ambientalmente responsável no manejo da antracnose, contribuindo para a produção de alimentos de qualidade e para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

5. Referências

ALTIERI, M. A. **Agroecologia**: bases científicas para uma agricultura sustentável. 3. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2012.

AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M.; BERGAMIN FILHO, A. (ed.). Manual de fitopatologia: doenças das plantas cultivadas. 5. ed. Ouro Fino: **Agrônoma Ceres**, 2016. v. 2.

ANDRADE, J. S.; VIEIRA, G. H. C. Doenças pós-colheita em mamão: etiologia e manejo. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 38, n. 2, p. 1-10, 2016.

ANDRADE, W. P.; VIEIRA, G. H. C. Efeito dos óleos essenciais sobre a antracnose *in vitro* e em frutos de mamoeiro. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 18, n. 1, p. 367-372, 2016.

AQUINO, C. F. *et al.* Ação e caracterização química de óleos essenciais no manejo da antracnose do maracujá. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 34, n. 4, p. 1059-1067, 2012.

ARAÚJO NETO, S. E. de *et al.* Controle pós-colheita da antracnose do maracujazeiro: amarelo com aplicação de óleo de copaíba. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 36, n. 2, p. 509–514, abr. 2014.

ARAÚJO, L.; STADNIK, M. J.; BORSATO, L. C. Epidemiologia da antracnose em frutos tropicais. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v. 40, n. 3, p. 210–218, 2014.

BAILEY, J. A.; JEGER, M. J. **Colletotrichum: biology, pathology and control**. Wallingford: CAB International, 1992.

BAKKALI, F. *et al.* Antigenotoxic properties of some essential oils and of some of their main constituents. **Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis**, [s. l.], v. 649, n. 1-2, p. 82-93, 2008.

BAKKALI, F.; AVERBECK, S.; AVERBECK, D.; IDAOMAR, M. Biological effects of essential oils: a review. **Food and Chemical Toxicology**, Oxford, v. 46, n. 2, p. 446-475, 2008.

BURT, S. Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods. **International Journal of Food Microbiology**, Amsterdam, v. 94, n. 3, p. 223–253, 2004.

CANNON, P. F.; DAMM, U.; JOHNSTON, P. R.; WEIR, B. S. Colletotrichum – current status and future directions. **Studies in Mycology**, Utrecht, v. 73, p. 181–213, 2012.

CORRÊA, L. A. D. *et al.* Antifungal potential of essential oils from *Pectis brevipedunculata* and *Dizygostemon riparius* in anthracnose control in mango. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 45, p. e–889, 2023.

CRUZ, M. E. S. *et al.* Plant extracts for controlling the post-harvest anthracnose of banana fruit. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 15, n. 4, p. 727–733, 2013.

CRUZ, M. F. A.; BARBOSA, J. C.; SANTOS, A. F. Antracnose da banana na pós-colheita. **Tropical Plant Pathology**, Brasília, v. 38, n. 4, p. 321–327, 2013.

DEAN, R.; VAN KAN, J. A. L.; PRETORIUS, Z. A. *et al.* The top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. **Molecular Plant Pathology**, Oxford, v. 13, n. 4, p. 414-430, 2012.

DHIFI, W. *et al.* Essential oils' chemical characterization and investigation of some biological activities: a critical review. **Medicines**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 25, 2016.

DUBEY, N. K. *et al.* Prospects of botanical pesticides in sustainable agriculture. **Current Science**, [s. l.], v. 98, n. 4, p. 479-480, 2010.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Bioeconomia: oportunidades e desafios para o Brasil**. Brasília: Embrapa, 2018.

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

HYLDGAARD, M.; MYGIND, T.; MEYER, R. L. Essential oils in food preservation: mode of action, synergies, and interactions with food matrix components. **Frontiers in Microbiology**, Lausanne, v. 3, p. 1–24, 2012.

NGUEFACK, J.; LETH, V.; AMVAM ZOLLO, P. H.; MATHUR, S. B. Evaluation of five essential oils from aromatic plants of Cameroon for controlling food spoilage and mycotoxin producing fungi. **International Journal of Food Microbiology**, Amsterdam, v. 94, n. 3, p. 329–334, 2004.

OECD. Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico. **The Bioeconomy to 2030: designing a policy agenda**. Paris: OECD Publishing, 2009.

OLIVEIRA, E. S. de; VIANA, F. M. P.; MARTINS, M. V. V. Alternativas a fungicidas sintéticos no controle da antracnose da banana. **Summa Phytopathologica**, v. 42, n. 4, p. 340-350, 2016.

PATTNAIK, S.; SUBRAMANYAM, V. R.; KOLE, C. Antibacterial and antifungal activity of ten essential oils in vitro. **Microbios**, Cambridge, v. 86, n. 349, p. 237–246, 1996.

RAJI, R. O. *et al.* Bioeconomy of essential oils: a review. **Journal of Essential Oil Research**, [s. l.], v. 29, n. 4, p. 311-322, 2017.

RAVEAU, R. *et al.* Essential oils as potential alternatives to synthetic fungicides, with a focus on Plant-Pathogen-Environment interactions in Terrestrial Ecosystems. **Plants**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 300, 2020.

SINGH, G.; MAURYA, S.; DE LAMPASONA, M. P.; CATALAN, C. Chemical constituents, antifungal and antioxidative potential of *Ocimum basilicum* essential oil and its acetone extract. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 53, n. 20, p. 7772–7777, 2005.

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

TAVASSOLI, S.; DJOMEH, Z. E. Total phenols, antioxidant potential and antimicrobial activity of methanol extract of rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.). **Global Veterinaria**, v. 7, n. 4, p. 337–341, 2011.

WEIR, B. S.; JOHNSTON, P. R.; DAMM, U. The *Colletotrichum gloeosporioides* species complex. **Studies in Mycology**, Utrecht, v. 73, p. 115-180, 2012.

CAPÍTULO 7

Incidência de *Streptococcus agalactiae* e estratégias de controle sanitário na tilapicultura: diagnósticos e perspectivas para o sul do Espírito Santo

Erivelto Oliveira de Souza, Lucas de Brites Senra, Macllene Rodrigues Zeferino, Pedro Pierro Mendonça, Willian Moreira da Costa, Atanásio Alves do Amaral, Maurício Novaes Souza

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-45-9.c7>

Resumo

O objetivo deste trabalho é analisar os principais desafios sanitários da tilapicultura nos municípios de Alegre e Muniz Freire (ES), com ênfase nas infecções causadas por *Streptococcus agalactiae*, e propor estratégias de mitigação baseadas em inovações tecnológicas. Trata-se de uma revisão de literatura fundamentada em artigos científicos e documentos técnicos, integrada à proposição de ferramentas de gestão. A intensificação dos sistemas de cultivo tem favorecido o surgimento de enfermidades associadas à alta densidade de estocagem, estresse fisiológico e variações na qualidade da água. O estudo aborda a epidemiologia do patógeno, com destaque para a virulência do Sorotipo III, e discute a transição para sistemas de Bioflocos (BFT) como barreira sanitária natural. São apresentadas estratégias de controle que priorizam a biossegurança e a vacinação em detrimento do uso de antimicrobianos. Conclui-se com a apresentação de um *checklist* executivo para aplicação imediata no campo, reforçando a necessidade de uma atuação integrada entre pesquisa e extensão para consolidar o desenvolvimento sustentável da tilapicultura regional até 2040.

Palavras-chave: Aquicultura continental. *Streptococcus agalactiae*. Sistema BFT. Biossegurança. Manejo produtivo. Extensão rural.

1. Introdução

A piscicultura no Brasil tem apresentado crescimento expressivo nas últimas décadas, consolidando-se como uma importante atividade do agronegócio. Nesse contexto, a tilapicultura destaca-se como o principal segmento produtivo, sendo responsável por cerca de 65% da produção nacional de peixes, com um volume estimado em 579.080 toneladas em 2023 e aumento de 93% no consumo nos últimos dez anos (Peixe BR, 2024). Esse avanço produtivo, embora promissor, levanta preocupações relacionadas à sanidade dos animais, especialmente diante da intensificação dos sistemas de cultivo.

Entre as espécies cultivadas, a tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) é a mais difundida no país, devido às suas características zootécnicas favoráveis, como rápido crescimento, rusticidade e boa qualidade da carne (Prabu *et al.*, 2019). Introduzida no Brasil no século passado, essa espécie tornou-se base da piscicultura nacional, contribuindo significativamente para a segurança alimentar e geração de renda.

No estado do Espírito Santo, a produção de peixes também tem apresentado crescimento gradual nos últimos anos. Dados recentes indicam que a produção passou de 19.030 toneladas em 2023 para 20.410 toneladas em 2024, alcançando 21.010 toneladas em 2025, com expectativa de continuidade dessa expansão (Sampaio; Stefany, 2026). Nesse cenário, a tilápia do Nilo se destaca como a principal espécie cultivada, com o município de Linhares figurando como maior produtor estadual (PEDEAG, 2024).

Em nível regional, municípios como Muniz Freire vêm se consolidando como polos relevantes da atividade aquícola, especialmente em sistemas produtivos conduzidos por agricultores familiares (Caus, 2024). A piscicultura, nesse contexto, assume papel estratégico na diversificação da renda, na segurança alimentar e na permanência do produtor no meio rural (Castilho-Barros *et al.*, 2020).

Iniciativas como o programa “Mais Peixes”, desenvolvido pelo Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper) em parceria com a Cooperativa dos Empreendedores Rurais de Domingos Martins (Coopram), têm contribuído para o fortalecimento da atividade por meio de assistência técnica, organização da comercialização e redução de custos de

produção, além de investimentos significativos na cadeia produtiva local (Prefeitura Municipal de Muniz Freire, 2025).

Apesar do crescimento do setor, a ocorrência de enfermidades infecciosas representa um dos principais entraves à sustentabilidade da piscicultura. Entre essas, as doenças bacterianas destacam-se pela elevada frequência e impacto econômico (Figueiredo; Leal, 2012; Cain, 2022). A estreptococose, por exemplo, é uma das enfermidades mais relevantes na tilapicultura, podendo causar septicemia e sinais clínicos como hemorragias, exoftalmia e natação errática. Entre os principais agentes etiológicos associados estão *Streptococcus spp.*, *Lactococcus spp.*, *Aeromonas hydrophila*, *Edwardsiella tarda*, *Flavobacterium columnare* e *Francisella orientalis* (Osman *et al.*, 2017; Haenen *et al.*, 2023) (Figura 1).

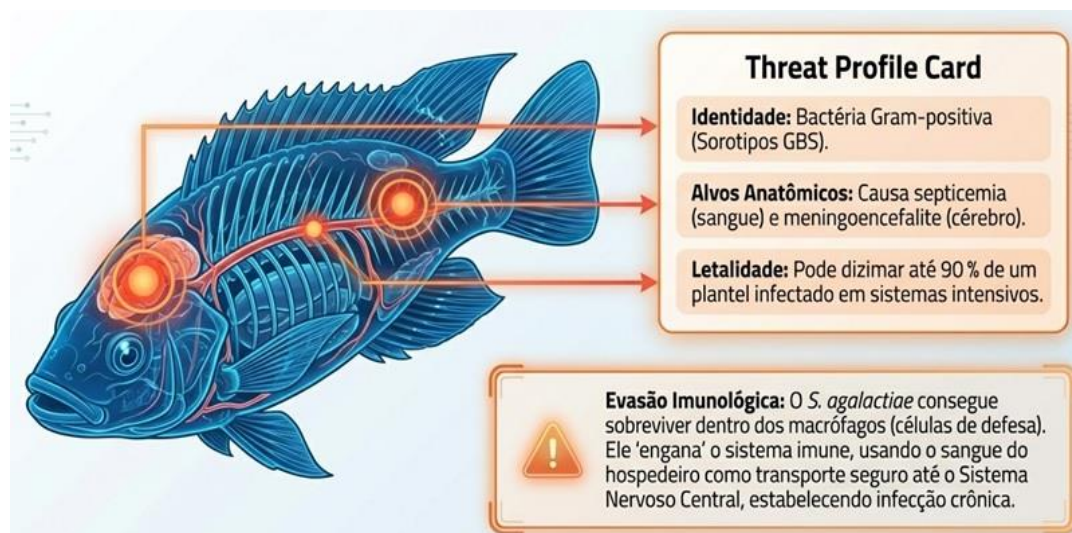


Figura 1. Representação microscópica e impacto patogênico de *Streptococcus agalactiae* na tilapicultura. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

O desenvolvimento dessas infecções está diretamente relacionado a fatores de manejo e qualidade ambiental, como temperatura da água, estresse, alta densidade de estocagem, manejo intensivo e parâmetros inadequados de qualidade da água, incluindo baixos níveis de oxigênio dissolvido e altas concentrações de amônia (Qu *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2025).

Peixes acometidos por infecções bacterianas apresentam sinais clínicos inespecíficos, como anorexia, melanose, exoftalmia, natação errática,

ulcerações cutâneas e ascite, além de alterações macroscópicas observadas à necropsia, como vísceras hemorrágicas, aumento de órgãos e presença de lesões nodulares (Al-Hussinee *et al.*, 2011; Laith *et al.*, 2017; Buján *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2024).

O controle dessas enfermidades, tradicionalmente realizado por meio de antibioticoterapia¹², apresenta limitações, como o desenvolvimento de resistência bacteriana e baixa eficácia em larga escala. Embora vacinas estejam em fase de desenvolvimento, ainda não são amplamente utilizadas. Diante desse cenário, torna-se fundamental investigar estratégias alternativas de prevenção e controle.

Assim, o presente estudo tem como objetivo analisar os principais desafios sanitários da tilapicultura nos municípios de Alegre e Muniz Freire (ES), com ênfase nas infecções causadas por *Streptococcus agalactiae*, além de avaliar e propor estratégias de mitigação fundamentadas em inovações tecnológicas, visando ao fortalecimento da sustentabilidade, da biossegurança e da eficiência produtiva da aquicultura local.

2. Tilapicultura e os desafios sanitários associados às doenças bacterianas

A produção de tilápia pode ser conduzida em sistemas extensivos, semi-intensivos e intensivos, sendo este último o mais amplamente adotado na atualidade. Os sistemas intensivos caracterizam-se por elevadas densidades de estocagem, uso de ração balanceada e manejo alimentar controlado, renovação frequente da água e maior nível de tecnificação (Souza; Leite, 2016). Esse modelo produtivo tem possibilitado ganhos expressivos de produtividade; porém, também impõe desafios significativos relacionados à sanidade dos animais (Figura 2).

Nesse contexto, o avanço da tilapicultura, especialmente sob regime intensivo, tem sido acompanhado pelo aumento na ocorrência de enfermidades, com destaque para as doenças bacterianas. Patógenos como *Streptococcus agalactiae*, *Francisella noatunensis* subsp. *orientalis*, *Aeromonas hydrophila* e

¹² Uso terapêutico de antibióticos para tratar infecções causadas exclusivamente por bactérias.

Edwardsiella tarda figuram entre os principais agentes etiológicos associados à tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*), podendo ocasionar elevadas taxas de mortalidade, redução no desempenho zootécnico e prejuízos econômicos significativos (Haenen *et al.*, 2023; Elsayed *et al.*, 2024).



Figura 2. Dinâmica do crescimento intensivo: o ponto de inflexão entre produtividade e colapso biológico. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A predisposição dos peixes às enfermidades não está associada apenas à presença de agentes patogênicos, mas também a um conjunto de fatores ambientais e de manejo. Conforme destacado por Tavares *et al.* (2005) e Sebastião *et al.* (2024), condições como baixa qualidade da água, transporte inadequado, manejo incorreto, altas densidades de estocagem, alimentação desequilibrada e acúmulo de matéria orgânica nos viveiros contribuem diretamente para o aumento da suscetibilidade dos animais às infecções.

As doenças bacterianas representam, portanto, um dos principais entraves sanitários da cadeia produtiva da tilapicultura, sendo responsáveis por perdas expressivas, sobretudo durante a fase de engorda. Estima-se que a mortalidade associada a esses patógenos possa comprometer cerca de 5% do plantel antes do abate, gerando impactos econômicos relevantes, que podem atingir milhões de reais anualmente (Kubitza, 2005; Assane *et al.*, 2022; Bondad-Reantaso *et al.*, 2023; Sebastião, 2024).

Diante desse cenário, um dos grandes desafios enfrentados pelos produtores, especialmente no estado do Espírito Santo, consiste em conciliar elevados níveis de produtividade com a manutenção de condições ambientais que reduzam os fatores de estresse inerentes aos sistemas intensivos. A alta densidade de peixes, a competição por alimento e as variações nos parâmetros de qualidade da água, quando não adequadamente manejadas, comprometem a homeostase dos organismos, aumentando a vulnerabilidade a doenças e prejudicando o desempenho produtivo (Figura 3).



Figura 3. O novo paradigma aquícola: integração de biotecnologia, monitoramento e sistemas de alta *performance*. Fonte: elaboração própria (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

No contexto capixaba, onde a tilapicultura tem se expandido principalmente em propriedades de base familiar, a adoção de boas práticas de manejo associadas ao monitoramento contínuo dos parâmetros ambientais torna-se essencial. Essas estratégias são fundamentais para garantir não apenas a viabilidade econômica da atividade, mas também a sustentabilidade dos sistemas produtivos ao longo do tempo.

A tilapicultura moderna, predominantemente intensiva, apesar de seus benefícios produtivos, intensifica a exposição dos peixes a fatores estressantes. Estudos recentes indicam que essas condições podem elevar os níveis de cortisol, promover imunossupressão e aumentar a predisposição às infecções bacterianas, comprometendo a saúde e o desempenho dos animais (Emam; Lambert; Brown, 2025; Aly *et al.*, 2025).

O estresse crônico, decorrente de fatores como alta densidade, manejo frequente, transporte, oscilações térmicas, alimentação inadequada e baixa qualidade da água, desencadeia respostas fisiológicas importantes, como o

aumento dos níveis plasmáticos de cortisol e glicose (Odhiambo *et al.*, 2020). Além disso, são observadas alterações hematológicas, incluindo redução no número de leucócitos, o que compromete a eficiência do sistema imunológico. Essas alterações reduzem a capacidade de resposta dos peixes frente aos agentes patogênicos, agravando os quadros infecciosos e impactando diretamente a sanidade e a produtividade dos sistemas aquícolas (Figura 4).

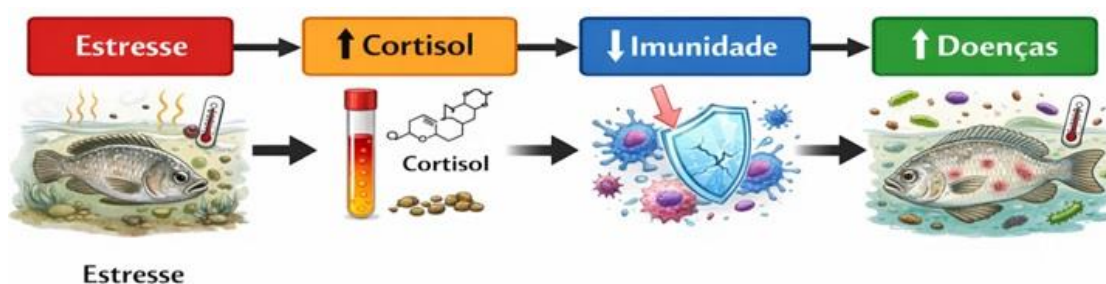


Figura 4. Efeitos do estresse crônico sobre a resposta fisiológica e imunológica de tilápias. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2025), com auxílio de IA (ChatGPT).

Em tilápias expostas a condições inadequadas de pH, especialmente em faixas muito ácidas ou alcalinas, observam-se respostas fisiológicas adversas, como elevação dos níveis de cortisol, alterações metabólicas e comprometimento do desempenho zootécnico. Além disso, o pH exerce influência direta sobre a forma química da amônia na água: em ambientes mais alcalinos, há aumento da fração de amônia não ionizada (NH_3), altamente tóxica aos peixes. Essa forma pode provocar lesões branquiais, desencadear estresse fisiológico, reduzir o crescimento e elevar as taxas de mortalidade (Paixão Lemos *et al.*, 2018).

De forma semelhante, para esses mesmos autores, o acúmulo de compostos nitrogenados, como nitrito e nitrato, geralmente associado ao excesso de matéria orgânica e à baixa renovação da água, intensifica o estresse fisiológico e compromete a homeostase dos organismos. Tais condições afetam negativamente parâmetros produtivos, como a conversão alimentar, a taxa de crescimento específico e a sobrevivência, evidenciando que a qualidade da água constitui um dos principais fatores determinantes do sucesso produtivo em sistemas intensivos de cultivo.

Sob essas condições adversas, a tilápia torna-se mais suscetível à ação de patógenos oportunistas, como *Streptococcus agalactiae*, *Francisella noatunensis* subsp. *orientalis*, *Aeromonas hydrophila* e *Edwardsiella tarda* (Haenen *et al.*, 2023). Esses microrganismos podem desencadear surtos de doenças com elevada mortalidade e significativa redução no desempenho zootécnico, comprometendo uma parcela expressiva do plantel, sobretudo durante a fase de engorda.

Nesse contexto, o principal desafio, especialmente em sistemas intensivos e em propriedades de base familiar, reside na conciliação entre altos níveis de produtividade e o controle rigoroso dos parâmetros ambientais. O manejo adequado do pH, da temperatura, dos compostos nitrogenados e da densidade de estocagem é fundamental para minimizar o estresse e manter o equilíbrio fisiológico dos peixes. A adoção de boas práticas de manejo contribui para a manutenção dos níveis de cortisol em patamares compatíveis com a homeostase, favorecendo a integridade do sistema imunológico.

Enfim, o monitoramento contínuo da qualidade da água, aliado a um manejo nutricional adequado, constitui estratégia essencial para o êxito da produção aquícola. Essas práticas se refletem em melhores índices de conversão alimentar, maior taxa de crescimento específico e aumento da sobrevivência dos peixes. Consequentemente, contribuem para a redução da incidência de enfermidades bacterianas e para a sustentabilidade da tilapicultura em longo prazo.

As doenças bacterianas representam um dos principais entraves sanitários da cadeia produtiva da tilapicultura, sendo responsáveis por perdas expressivas, sobretudo durante a fase de engorda. Embora estimativas clássicas indicassem que a mortalidade associada a esses patógenos comprometesse cerca de 5% do plantel (Kubitza, 2005; Bondad-Reantaso *et al.*, 2023), o cenário atual de intensificação produtiva elevou significativamente esses índices (Assane *et al.*, 2022; Bondad-Reantaso *et al.*, 2023).

Estudos recentes apontam que surtos de patógenos emergentes, como a *Francisella noatunensis* e novas cepas de *Streptococcus agalactiae*, podem elevar a mortalidade para patamares entre 15% e 40% em sistemas intensivos,

gerando impactos econômicos globais superiores a US\$ 6 bilhões anualmente (Assane *et al.*, 2022; Bondad-Reantaso *et al.*, 2023).

A superação desses desafios de biossegurança é um requisito fundamental para que o Brasil cumpra sua agenda estratégica: a rota para a liderança global em 2040. Atualmente, o país já detém a hegemonia absoluta na produção de tilápias na América do Sul e é o maior produtor de peixes de cultivo de todas as Américas (PEIXE BR, 2025). Com a consolidação de investimentos em genética, nutrição e sanidade, a meta do setor é alcançar o topo do ranking mundial nas próximas duas décadas, transformando o atual protagonismo continental em uma liderança global definitiva (Sebastião *et al.*, 2024) (Figura 5).



Figura 5. Projeções estratégicas e competitividade sistêmica: o caminho para a liderança global da tilapicultura em 2040. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A Figura 5 sintetiza os principais vetores que sustentam a trajetória de crescimento da tilapicultura brasileira, evidenciando a importância de uma abordagem sistêmica para a consolidação dessa liderança. Nesse cenário, a competitividade do setor está diretamente relacionada à capacidade de integração entre inovação tecnológica, governança institucional e sustentabilidade produtiva. A adoção de boas práticas de biossegurança, aliada ao avanço em melhoramento genético, eficiência alimentar e gestão ambiental, constitui um diferencial estratégico frente aos mercados internacionais.

Além disso, a ampliação do acesso a mercados externos, o fortalecimento das cadeias logísticas e a conformidade com exigências sanitárias globais são

fatores determinantes para a inserção competitiva do Brasil no comércio mundial. Assim, a convergência entre ciência, política pública e iniciativa privada será decisiva para transformar o potencial produtivo em liderança global efetiva até 2040.

3. Estreptococose em peixes: aspectos gerais e abordagens de controle

A estreptococose consolidou-se como uma das principais enfermidades bacterianas na aquicultura, especialmente em sistemas intensivos de produção de tilápia. A interação entre patógenos altamente virulentos, elevadas densidades de estocagem e práticas de manejo inadequadas favorece a ocorrência de surtos, tornando essa doença um dos principais entraves à sustentabilidade da atividade aquícola.

Trata-se de uma infecção amplamente distribuída em nível mundial, acometendo diversas espécies de peixes de água doce e marinhos (El-Noby *et al.*, 2021). Na tilapicultura, a estreptococose figura entre as principais causas de mortalidade, frequentemente associada a quadros agudos com elevada letalidade (Mahmoud *et al.*, 2023). Além das perdas diretas por mortalidade, a doença também pode se manifestar de forma crônica, resultando em lesões musculares, comprometimento de órgãos internos e redução da qualidade da carcaça, o que impacta negativamente a aceitação comercial do produto (Van Doan *et al.*, 2022).

Do ponto de vista econômico, os impactos da estreptococose são expressivos. Estimativas indicam que as perdas globais anuais relacionadas à doença podem alcançar centenas de milhões de dólares, com registros de mortalidade que chegam a 70% em lotes infectados (Wang *et al.*, 2023). Estudos de caso em sistemas comerciais evidenciam reduções significativas na biomassa produzida e na receita dos empreendimentos, afetando diretamente a rentabilidade, o fluxo de caixa e, em alguns contextos, a segurança alimentar regional (Paredes-Trujillo; Mendoza-Carranza, 2024) (Figura 6).

Além dos prejuízos associados à mortalidade, a ocorrência da doença implica aumento dos custos de produção, devido à necessidade de tratamentos terapêuticos, descarte de animais, redução no desempenho zootécnico e investimentos adicionais em medidas de biossegurança, desenvolvimento e

aplicação de vacinas, bem como estratégias de melhoramento genético voltadas à resistência às enfermidades.



Figure 6. Dinâmica dos prejuízos na tilapicultura: correlação entre o impacto biológico da estreptococose e as perdas econômicas diretas. Fonte: Adaptado de Delphino, Joshi e Alvarez (2022) e Kayansamruaj *et al.* (2023), com suporte de inteligência artificial generativa (ChatGPT, 2026).

A ocorrência da estreptococose está fortemente associada à intensificação dos sistemas produtivos, especialmente aqueles caracterizados por altas densidades de estocagem, manejo frequente e uso de estruturas como tanques-rede e viveiros de alta produtividade (El-Noby *et al.*, 2021). Nessas condições, fatores estressores tornam-se determinantes para o desencadeamento de surtos, destacando-se temperaturas elevadas (superiores a 27–30 °C), variações térmicas, baixos níveis de oxigênio dissolvido, acúmulo de compostos nitrogenados (amônia e nitrito), superlotação e práticas de sobrealimentação (Taukhid *et al.*, 2023). Esses elementos comprometem o equilíbrio fisiológico dos peixes, aumentando sua suscetibilidade às infecções.

Em sistemas de cultivo em tanques-rede, instalados em rios e reservatórios, a dinâmica da água representa um fator adicional de risco. A circulação hídrica compartilhada, aliada à movimentação de peixes entre diferentes unidades produtivas, favorece a disseminação do patógeno em escala regional, dificultando o controle sanitário (Jantrakajorn *et al.*, 2014).

Esse cenário é agravado pela complexidade epidemiológica da doença, que envolve diferentes espécies e sorotipos de *Streptococcus*, além da emergência de cepas com resistência a antimicrobianos. Soma-se a isso a ausência de vacinas com eficácia universal e a variabilidade das respostas imunológicas entre espécies e linhagens de peixes (Juárez-Cortés *et al.*, 2024).

O uso de antibióticos, embora ainda empregado em algumas situações, apresenta limitações importantes. Em infecções granulomatosas, sua eficácia tende a ser reduzida, além de implicar aumento nos custos de produção, riscos associados à resistência antimicrobiana e possibilidade de resíduos nos produtos aquícolas. Nesse contexto, estratégias preventivas assumem papel central no controle da doença (Delphino *et al.*, 2022).

Medidas como a adoção de protocolos rigorosos de biossegurança, para esses mesmos autores, o manejo adequado dos fatores de estresse, a utilização de vacinas específicas e a seleção de linhagens geneticamente mais resistentes configuram alternativas mais sustentáveis. No entanto, a efetividade dessas abordagens depende de investimentos contínuos, capacitação técnica dos produtores e integração entre práticas de manejo, monitoramento ambiental e avanços em biotecnologia.

3.1. Estreptococose: etiologia, transmissão e controle

O gênero *Streptococcus* é composto por bactérias cocoides¹³ (0,3–0,5 µm), Gram-positivas, que se organizam tipicamente em cadeias. São anaeróbias facultativas, podendo algumas espécies apresentar crescimento favorecido em atmosferas enriquecidas com CO₂. Essas bactérias são imóveis, não formadoras de esporos, catalase¹⁴ e oxidase negativas, e apresentam metabolismo fermentativo, com produção predominante de ácido láctico. Podem ainda apresentar diferentes padrões de hemólise, o que auxilia na sua caracterização microbiológica (Patterson; Baron, 1996).

¹³ São bactérias que possuem formato esférico, arredondado ou elíptico.

¹⁴ É uma enzima antioxidante essencial encontrada na maioria dos organismos vivos, incluindo animais, plantas e bactérias.

Entre as espécies de maior relevância na piscicultura, destacam-se *Streptococcus agalactiae*, *S. iniae*, *S. dysgalactiae*, *S. ictaluri*, *S. phocae* e *S. parauberis* (Figueiredo *et al.*, 2012). Esses agentes têm sido associados a surtos de elevada mortalidade em tilápias em diversos países, incluindo Japão, Israel, Estados Unidos, Taiwan, Filipinas e Brasil, configurando-se como um importante problema sanitário em sistemas intensivos de produção. Além dos impactos biológicos, tais infecções acarretam prejuízos econômicos expressivos à cadeia produtiva (Kubitza, 2005; Sebastião *et al.*, 2024).

Os estreptococos são considerados patógenos oportunistas, cuja manifestação está fortemente relacionada a condições de estresse. Fatores como alta densidade de estocagem, baixa qualidade da água, manejo inadequado e falhas nutricionais comprometem o sistema imunológico dos peixes, aumentando sua suscetibilidade à infecção. Dessa forma, o manejo inadequado constitui um dos principais gatilhos para o desenvolvimento da estreptococose (Panisk *et al.*, 2005; Sebastião *et al.*, 2024).

A transmissão da doença ocorre predominantemente de forma horizontal, sendo favorecida pela convivência entre peixes infectados, mortos e indivíduos saudáveis. Esse contato direto facilita a disseminação do agente no ambiente de cultivo, especialmente em sistemas intensivos, onde a proximidade entre os animais é elevada. Assim, a rápida propagação da enfermidade reforça a importância do monitoramento contínuo dos lotes e da adoção de medidas preventivas (Iregui, 2014).

O diagnóstico da estreptococose deve ser conduzido de forma criteriosa, envolvendo avaliação clínica, histórico produtivo e análise laboratorial. A inspeção em campo permite a identificação de sinais clínicos sugestivos, enquanto a coleta de peixes doentes, seguida de eutanásia e necropsia, possibilita a obtenção de amostras para exames histopatológicos e microbiológicos, fundamentais para a confirmação do agente etiológico (Yanong; Francis-Floyd, 2002; Iregui *et al.*, 2014).

O tratamento convencional baseia-se no uso de antibióticos, sendo que, no Brasil, apenas a oxitetraciclina e o florfenicol são autorizados para uso na

aquicultura (MAPA, 2022). O florfenicol, pertencente à classe dos anfenicóis¹⁵, tem demonstrado maior eficácia no controle da doença, em função de sua capacidade de reduzir significativamente a carga bacteriana nos animais infectados (Chideroli *et al.*, 2017). A administração é realizada, em geral, por meio da incorporação do fármaco na ração, seguindo dosagens recomendadas pelos fabricantes, em torno de 10 mg/kg. Contudo, estudos indicam que doses mais elevadas, entre 20 e 40 mg/kg, podem apresentar maior eficiência na redução da mortalidade, o que evidencia a necessidade de ajustes técnicos e validações específicas (Oliveira, 2018).

Cabe ressaltar que bactérias do gênero *Streptococcus* estão naturalmente presentes em ambientes aquícolas, como água e sedimentos, o que dificulta seu controle absoluto (Sule *et al.*, 2025). Nesse contexto, estratégias preventivas assumem papel fundamental na redução do risco de surtos. Entre as principais medidas destacam-se a aquisição de alevinos de procedência certificada, o uso de quarentena, o controle adequado da densidade de estocagem e a minimização de estressores durante o manejo e transporte.

Adicionalmente, práticas como a remoção imediata de peixes mortos ou doentes, o fornecimento de rações de qualidade e a implantação de protocolos rigorosos de higiene e biossegurança contribuem significativamente para a manutenção da sanidade do sistema produtivo. Tais ações favorecem o equilíbrio ambiental e refletem diretamente no melhor desempenho zootécnico dos animais. Essa gestão proativa reduz a carga patogênica no ambiente aquático e minimiza a necessidade de intervenções terapêuticas onerosas. Consequentemente, o fortalecimento das barreiras sanitárias consolida a biossegurança como o pilar central para a competitividade e a longevidade econômica da tilapicultura.

Por fim, a vacinação tem se consolidado como uma estratégia promissora no controle da estreptococose, especialmente em sistemas intensivos. Trata-se de uma abordagem imunoprolática¹⁶ em expansão, podendo ser aplicada por diferentes vias, como intraperitoneal, imersão ou via oral. Dentre essas, a via

¹⁵ São uma classe de antibióticos de amplo espectro, derivados do propanodiol (composto orgânico líquido), conhecidos por sua alta eficácia bacteriostática (inibem o crescimento bacteriano) ao bloquear a síntese proteica nas bactérias.

¹⁶ Medidas preventivas que utilizam o sistema imunológico para proteger contra doenças.

intraperitoneal tende a apresentar maior eficiência, embora demande maior manejo. Assim, a vacinação desponta como uma ferramenta relevante na prevenção da doença e na promoção da sustentabilidade da tilapicultura.

Contudo, de acordo com Sule *et al.* (2025), a eficácia dos programas de imunização enfrenta o desafio da diversidade de cepas circulantes, com destaque para a recente ameaça representada pelo sorotipo III de *Streptococcus agalactiae*. Diferente dos sorotipos I e II, o sorotipo III tem demonstrado uma virulência superior e uma capacidade de disseminação acelerada em diversas regiões produtoras, estando frequentemente associado a surtos de alta mortalidade, mesmo em plantéis previamente vacinados com formulações convencionais.

Para esses mesmos autores, a emergência desse sorotipo impõe a necessidade urgente de atualização das vacinas e do fortalecimento das medidas de biossegurança, uma vez que a sua presença pode comprometer significativamente os índices produtivos e a viabilidade econômica da atividade (Figura 7).



Figura 7. Vulnerabilidade sistêmica: o impacto do *Streptococcus agalactiae* (Sorotipo III) sobre as barreiras sanitárias tradicionais. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A Figura 7 evidencia a fragilidade das barreiras sanitárias convencionais diante da emergência de cepas mais virulentas, como o sorotipo III de

Streptococcus agalactiae, ressaltando a necessidade de uma abordagem mais dinâmica e integrada na gestão da sanidade aquícola. Nesse contexto, torna-se fundamental a adoção de estratégias complementares, como o monitoramento epidemiológico contínuo, o desenvolvimento de vacinas multivalentes e o uso de ferramentas de diagnóstico rápido. Além disso, o fortalecimento das práticas de biossegurança, incluindo controle rigoroso da qualidade da água, manejo adequado da densidade de estocagem e rastreabilidade dos lotes, é essencial para reduzir a disseminação do patógeno.

3.2. Epidemiologia, diagnóstico e estratégias de controle da estreptococose em peixes

A estreptococose em peixes está fortemente associada a sistemas de produção intensivos, nos quais elevadas densidades de estocagem e condições ambientais desfavoráveis favorecem o surgimento e a disseminação da doença. Fatores como oscilações de temperatura, baixos níveis de oxigênio dissolvido, acúmulo de amônia e nitrito, superlotação, sobrealimentação e manejo excessivo atuam como importantes agentes estressores (Chew *et al.*, 2024). Essas condições comprometem a resposta imune dos peixes, tornando-os mais suscetíveis à infecção e criando um ambiente propício para o estabelecimento e a propagação do patógeno.

A transmissão ocorre predominantemente de forma horizontal, por meio do contato direto entre indivíduos infectados, da exposição à água contaminada e da permanência de peixes doentes ou mortos no sistema produtivo. Esses elementos funcionam como importantes reservatórios e fontes de infecção, especialmente em viveiros e tanques intensivos, onde a proximidade entre os animais facilita a rápida disseminação do agente etiológico (Salama; Murray, 2011).

Além da transmissão horizontal, evidências recentes indicam a possibilidade de transmissão vertical em tilápias. Espécies como *Streptococcus agalactiae* e *S. iniae* já foram detectadas em sêmen, ovos e na prole de reprodutores aparentemente saudáveis, sugerindo a transferência do patógeno dos progenitores para larvas e alevinos (Pradeep *et al.*, 2016). Essa via de

transmissão representa um desafio adicional para os sistemas produtivos, pois compromete programas de produção livre de patógenos específicos e reforça a necessidade de rigoroso controle sanitário dos reprodutores.

Outro aspecto relevante da epidemiologia da estreptococose é a ampla distribuição ambiental dos agentes do gênero *Streptococcus*. Essas bactérias podem ser isoladas da água, dos sedimentos e do trato gastrointestinal de diferentes organismos aquáticos, o que favorece sua persistência no ambiente, mesmo na ausência de sinais clínicos evidentes. Essa característica dificulta a erradicação do patógeno e contribui para a recorrência de surtos em sistemas de produção.

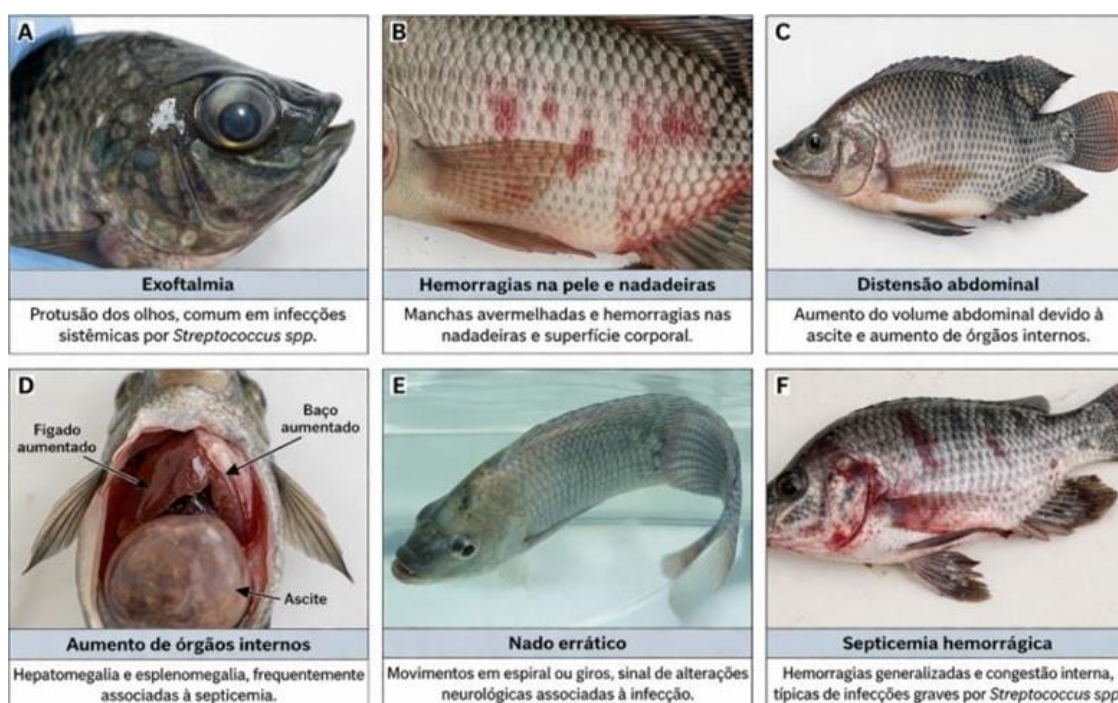


Figura 8. Principais sinais clínicos da estreptococose em tilápias (*Oreochromis niloticus*): (A) exoftalmia; (B) hemorragias na pele e nas nadadeiras; (C) distensão abdominal; (D) aumento de órgãos internos (hepatomegalia e esplenomegalia) associados à presença de ascite; (E) nado errático; (F) septicemia hemorrágica. Esses sinais são frequentemente associados a infecções por *Streptococcus agalactiae* e *Streptococcus iniae*. Fonte: Austin; Austin (2016); Tavares-Dias *et al.* (2014); e Klesius *et al.* (2008).

O diagnóstico da estreptococose deve ser conduzido de forma integrada, combinando avaliação clínica, necropsia e análises laboratoriais. A identificação

precoce da doença é fundamental para a adoção de medidas de controle eficazes. Entre os principais sinais clínicos observados destacam-se letargia, natação errática, frequentemente em movimentos circulares ou em espiral, exoftalmia, hemorragias cutâneas e nas nadadeiras, distensão abdominal e aumento de órgãos internos, geralmente associados a quadros de septicemia hemorrágica (Figura 8) (Osman *et al.*, 2017).

No ambiente laboratorial, a identificação inicial dos agentes do gênero *Streptococcus* baseia-se na observação de cocos Gram-positivos organizados em cadeias, catalase negativos e, frequentemente, β -hemolíticos, isolados de órgãos como cérebro, rim, fígado, baço e olhos. Embora métodos fenotípicos e testes bioquímicos ainda sejam amplamente utilizados na rotina diagnóstica, estes apresentam limitações quanto à precisão na diferenciação entre espécies, o que tem impulsionado a adoção de abordagens mais sensíveis e específicas, baseadas em técnicas moleculares.

Nesse sentido, ferramentas como o sequenciamento do gene 16S rRNA e métodos de biologia molecular permitem maior acurácia na identificação de espécies e cepas bacterianas. Adicionalmente, técnicas mais recentes, como a PCR em tempo real (qPCR) espécie-específica, possibilitam a detecção de *Streptococcus iniae* com elevada sensibilidade, inclusive em peixes assintomáticos, especialmente quando associadas a etapas de enriquecimento bacteriano e a análises imunohistoquímicas (Torres-Corral; Santos, 2021; Phasunon *et al.*, 2023).

Dessa forma, a integração de métodos clínico-patológicos, bacteriológicos e moleculares é recomendada para o diagnóstico definitivo e para a vigilância sanitária dos plantéis, sobretudo em sistemas intensivos, nos quais a detecção precoce é determinante para reduzir perdas produtivas e limitar a disseminação da enfermidade.

O tratamento da estreptococose em peixes baseia-se, predominantemente, no uso de antibióticos de amplo espectro, como oxitetraciclina, florfenicol, amoxicilina e eritromicina, geralmente administrados via ração. Em tilápias, infecções causadas por *Streptococcus agalactiae* e *S. iniae* são frequentemente tratadas com esses fármacos, embora a escolha do antimicrobiano deva considerar a legislação vigente e as especificidades regionais de produção.

Entretanto, a eficácia desses tratamentos tem sido progressivamente comprometida pelo aumento da resistência antimicrobiana, observada em diversas espécies de *Streptococcus* e outros cocos Gram-positivos. A resistência a classes como penicilinas, aminoglicosídeos, macrolídeos e tetraciclina favorece a recorrência de surtos e representa um risco à saúde pública, tanto pela seleção de cepas multirresistentes quanto pela presença de resíduos de antibióticos no ambiente aquático e nos produtos destinados ao consumo humano.

Diante dessas limitações, tem crescido o interesse por estratégias terapêuticas alternativas. Entre elas, destacam-se as endolisinas derivadas de bacteriófagos, que têm demonstrado eficácia semelhante à de antibióticos sistêmicos em infecções experimentais por *S. iniae*, promovendo aumento na taxa de sobrevivência dos peixes (Deshotel *et al.*, 2024). Paralelamente, o uso de probióticos, imunomodulantes e fitoterápicos vem sendo investigado como estratégia complementar ou substitutiva, embora ainda existam lacunas quanto à padronização de doses, segurança e biodisponibilidade.

Dessa forma, recomenda-se que o uso de antimicrobianos seja criterioso e fundamentado em testes de sensibilidade, sendo sempre associado à adoção de boas práticas de manejo. Essa abordagem integrada é essencial para mitigar o avanço da resistência antimicrobiana e garantir a sustentabilidade da produção aquícola.

A prevenção, por sua vez, constitui a estratégia mais eficaz e economicamente viável para o controle da estreptococose em tilápias, sendo preferível às medidas curativas. Essa abordagem baseia-se na integração entre manejo adequado, biossegurança e imunoprofilaxia, formando um conjunto de ações capazes de reduzir significativamente a incidência da doença em sistemas intensivos.

No âmbito do manejo, é fundamental manter a qualidade da água em níveis adequados, com boa oxigenação, baixos teores de amônia e nitrito e estabilidade de parâmetros como temperatura. O controle da densidade de estocagem, a redução do estresse decorrente do manejo e a remoção imediata de peixes doentes ou mortos são medidas essenciais para conter a disseminação do patógeno.

A biossegurança envolve a utilização de alevinos e reprodutores oriundos de criatórios certificados e livres de patógenos, bem como a adoção de quarentena para novos lotes. Medidas complementares incluem o controle de acesso de pessoas e equipamentos, a desinfecção de estruturas, o tratamento da água, o descarte adequado de resíduos e o monitoramento sanitário contínuo, especialmente diante do risco de transmissão vertical.

Por fim, a imunoprofilaxia¹⁷ destaca-se como uma das estratégias mais promissoras, por meio do uso de vacinas contra *Streptococcus* spp.. Essas vacinas têm demonstrado aumento na taxa de sobrevivência dos peixes, embora sua eficácia possa variar conforme as cepas envolvidas. Nesse contexto, o desenvolvimento de vacinas bivalentes, que combinam a proteção contra os sorotipos Ib e III, representa um avanço significativo para a tilapicultura brasileira, garantindo uma resposta imunológica mais robusta frente às variantes mais prevalentes e agressivas no campo (Figura 9).



Figura 9. A resposta científica: a vacina bivalente (Ib + III). Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Além disso, o uso de probióticos, imunoestimulantes e extratos vegetais têm apresentado resultados positivos como estratégias complementares. Assim, a integração dessas diferentes abordagens constitui a forma mais eficiente de

¹⁷ É a prevenção de doenças infecciosas através do fortalecimento do sistema imune, utilizando vacinas (imunidade ativa) ou soros/imunoglobulinas (imunidade passiva)

controle da estreptococose, especialmente em um cenário marcado pela crescente resistência antimicrobiana e pela busca por sistemas produtivos mais sustentáveis.

4. Manejo e desafios sanitários da tilapicultura em Alegre e Muniz Freire frente a *Streptococcus agalactiae*

A tilapicultura nos municípios de Alegre e Muniz Freire tem adquirido crescente relevância no contexto da aquicultura do sul do Espírito Santo, sendo predominantemente conduzida em sistemas de base familiar. A expansão da atividade, associada à intensificação dos sistemas produtivos, tem contribuído para o aumento da produtividade. Contudo, esse avanço também tem evidenciado desafios sanitários significativos, especialmente relacionados às infecções bacterianas causadas por *Streptococcus agalactiae*, reconhecido como um dos principais agentes etiológicos que afetam a tilapicultura (Debnath *et al.*, 2023; Abdallah *et al.*, 2024).

No município de Alegre, a produção ocorre majoritariamente em viveiros escavados, com diferentes níveis de intensificação. A atividade desempenha papel relevante na diversificação da produção agropecuária e na geração de renda no meio rural. Além disso, as condições ambientais locais, como a disponibilidade hídrica e o clima favorável, possibilitam a produção contínua ao longo do ano: por um lado, favorece a atividade; por outro, pode contribuir para a manutenção e circulação de patógenos no sistema.

De forma semelhante, em Muniz Freire, a tilapicultura tem se consolidado como atividade estratégica para o desenvolvimento rural, sendo desenvolvida principalmente em sistemas semi-intensivos e intensivos, com predomínio de viveiros escavados e, em menor escala, uso de tanques-rede. O fortalecimento da atividade no município tem sido impulsionado por iniciativas institucionais, como o programa “Mais Peixes”, além de investimentos em infraestrutura e capacitação técnica, evidenciados por eventos como o Fórum de Piscicultura realizado em 2024 (Ribeiro, 2024).

Nesse cenário, o apoio de instituições de pesquisa e extensão, como o Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper),

tem sido fundamental para a disseminação de boas práticas de manejo, biossegurança e organização produtiva. Ainda assim, a intensificação dos sistemas, especialmente quando associada a altas densidades de estocagem e limitações técnicas no manejo, favorece a ocorrência e a disseminação de enfermidades bacterianas (Debnath *et al.*, 2019).

Fatores como variações nos parâmetros de qualidade da água, acúmulo de compostos nitrogenados, alimentação inadequada e estresse fisiológico atuam diretamente na redução da capacidade imunológica dos peixes, tornando-os mais suscetíveis à infecção por patógenos oportunistas (Paredes-Trujillo; Mendoza-Carranza, 2022). Ademais, as condições ambientais da região, incluindo temperatura e regime hídrico, influenciam a dinâmica epidemiológica dessas enfermidades. Nesse contexto, a Figura 10 sintetiza os principais fatores ambientais e de manejo associados à ocorrência de estreptococose na tilapicultura, evidenciando a complexa interação entre condições produtivas, fatores ambientais e saúde dos organismos cultivados.

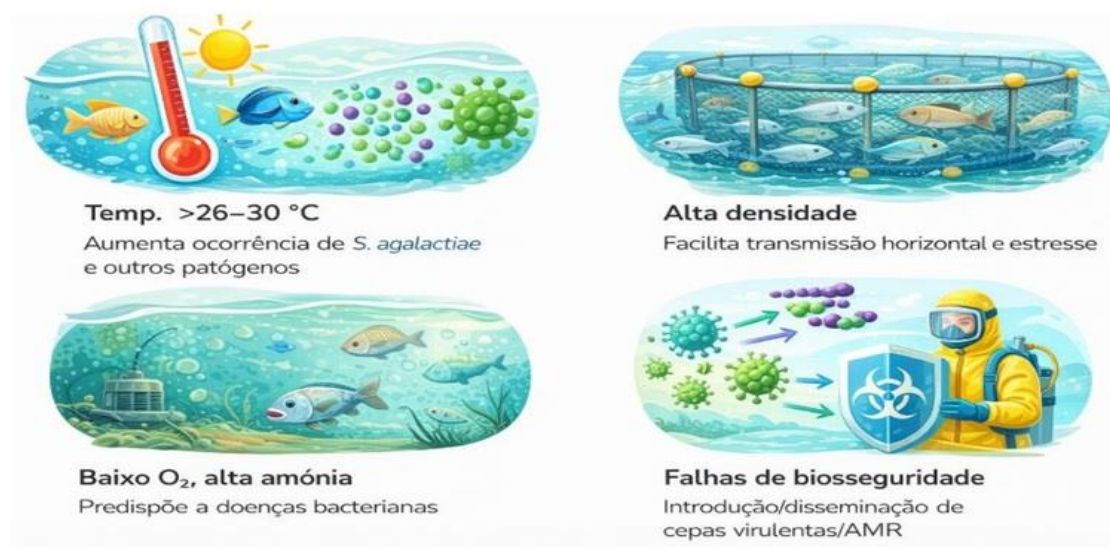


Figura 10. Principais fatores de risco ambientais e de manejo para streptococoses. Fonte: Paredes-Trujillo e Mendoza-Carranza (2022), com auxílio de IA (ChatGPT).

Períodos de temperaturas elevadas, especialmente durante o verão, favorecem a multiplicação e aumentam a virulência de *Streptococcus agalactiae*, intensificando o risco de surtos em sistemas de cultivo (Abdallah *et al.*, 2024). A

transmissão horizontal é potencializada em condições de alta densidade de estocagem, nas quais a proximidade entre os indivíduos facilita a rápida disseminação do patógeno, sobretudo em sistemas intensivos (Haenen *et al.*, 2023). Soma-se a isso a limitação no acesso contínuo à assistência técnica especializada em algumas propriedades, o que pode comprometer a adoção adequada de práticas de manejo sanitário (Mian *et al.*, 2009).

Nesse contexto, a capacitação dos produtores e a atuação integrada entre instituições de pesquisa, extensão e o setor produtivo tornam-se fundamentais para a mitigação dos riscos sanitários e para a promoção da sustentabilidade da atividade. Assim, a adoção de estratégias integradas de manejo configura-se como elemento central no controle das enfermidades bacterianas (Figura 11).

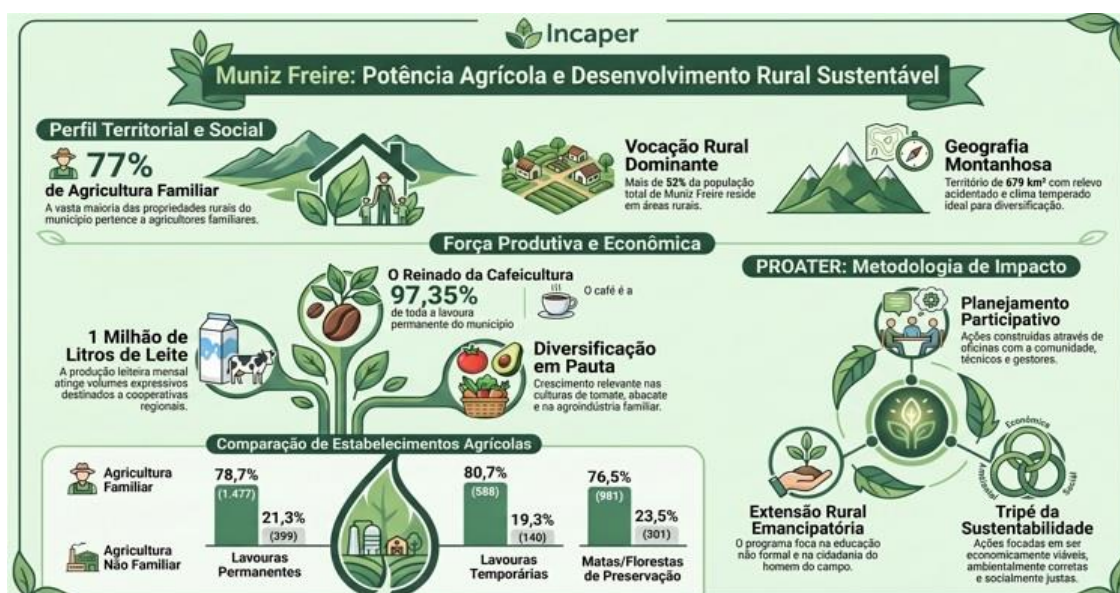


Figura 11. Modelo de governança aquícola regional: integração entre pesquisa, extensão rural e o setor produtivo em Muniz Freire, ES. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Entre as principais medidas, destaca-se o monitoramento contínuo da qualidade da água, incluindo parâmetros como temperatura, oxigênio dissolvido, pH e compostos nitrogenados, uma vez que variações nesses fatores estão diretamente associadas ao estresse fisiológico dos peixes e à maior incidência de doenças (Paredes-Trujillo; Mendoza-Carranza, 2022). O controle da densidade de estocagem também é essencial para evitar condições de superlotação que favoreçam a transmissão de patógenos.

Adicionalmente, a implantação de medidas de biossegurança, como a desinfecção de equipamentos, o controle da origem dos alevinos e a adoção de períodos de quarentena, contribui significativamente para reduzir a introdução e a disseminação de agentes infecciosos nos sistemas produtivos. No aspecto nutricional, o fornecimento de dietas balanceadas e adequadas às exigências da espécie fortalece o sistema imunológico, aumentando a resistência dos peixes às infecções (Debnath *et al.*, 2023).

Complementando essas ações, de acordo com esses mesmos autores, a escolha do método de imunização deve ser pautada em uma matriz de decisão que considere o estágio de desenvolvimento dos animais, o volume do plantel e o custo-benefício operacional. Essa análise técnica permite selecionar entre vias de imersão, oral ou intraperitoneal, garantindo que a estratégia de vacinação seja não apenas biologicamente eficaz, mas também economicamente viável dentro da logística da propriedade (Figura 12).

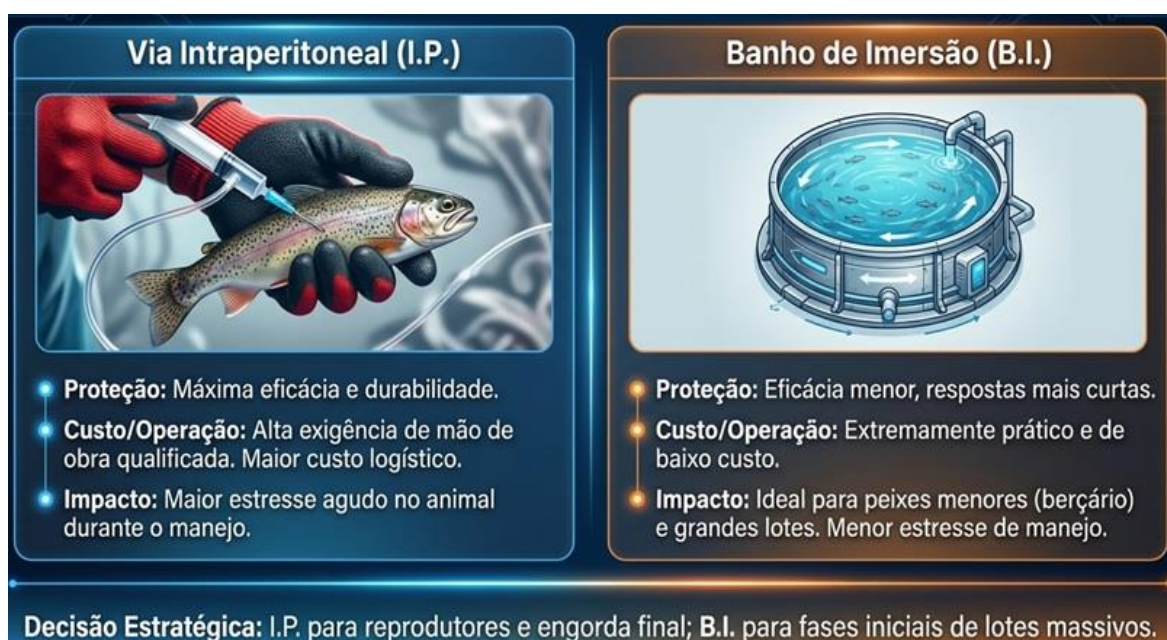


Figura 12. Matriz de viabilidade vacinal: correlação entre métodos de aplicação, custos operacionais e eficácia imunogênica. Fonte: elaboração própria (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Apesar da relevância da tilapicultura em Alegre e Muniz Freire, observa-se uma carência de estudos específicos sobre a ocorrência, distribuição e impactos de *Streptococcus agalactiae* nos sistemas aquícolas locais. Essa lacuna limita a

compreensão da dinâmica epidemiológica da doença na região e dificulta o desenvolvimento de estratégias de controle mais direcionadas e eficazes.

Dessa forma, destaca-se a necessidade de pesquisas aplicadas que investiguem as condições sanitárias, os fatores de risco e os impactos produtivos associados a esse patógeno em escala regional. A geração de dados locais é essencial para subsidiar a tomada de decisão por parte de produtores e instituições, contribuindo para o aprimoramento das práticas de manejo e para a consolidação de uma tilapicultura mais sustentável no sul do Espírito Santo.

5. Boas práticas de manejo sanitário na tilapicultura: recomendações para produtores

A adoção de boas práticas de manejo sanitário é fundamental para reduzir a ocorrência de enfermidades bacterianas na tilapicultura, especialmente em sistemas intensivos e semi-intensivos. Essas práticas atuam diretamente na prevenção de surtos, na melhoria do desempenho zootécnico e na sustentabilidade da produção, sendo especialmente relevantes para sistemas de base familiar. Nesse contexto, observa-se uma importante mudança de paradigma com a implantação do sistema de bioflocos (BFT) (Figura 13).



Figura 13. O sistema BFT como alternativa sustentável: redução do descarte de efluentes e otimização da biossegurança regional. Fonte: elaboração própria (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A tecnologia da implantação do sistema de bioflocos (BFT) promove um ambiente de cultivo controlado onde a microbiota benéfica auxilia na manutenção da qualidade da água e na inibição de patógenos, convertendo resíduos nitrogenados em proteína microbiana e reduzindo drasticamente a necessidade de renovação hídrica, o que fortalece a biossegurança e a resiliência do sistema (Avnimelech, 2015; Lima *et al.*, 2021; EMBRAPA, 2025).

De acordo com esses mesmos autores, o estabelecimento de um berçário em sistema de bioflocos (BFT) constitui um desafio estratégico fundamental, pois exige o domínio técnico da dinâmica de comunidades microbianas desde as primeiras fases de vida dos alevinos.

Diferente dos sistemas convencionais, o berçário BFT demanda um equilíbrio rigoroso entre a carga orgânica, a aeração constante e a relação carbono/nitrogênio para que o "biofoco" atue simultaneamente como suplemento alimentar e barreira sanitária natural. O sucesso nessa etapa é determinante, pois permite a entrega de juvenis com sistema imunológico mais robusto e uniformidade de peso, mitigando riscos sanitários que poderiam comprometer as fases subsequentes de engorda (Figura 14).



Figura 14. O desafio estratégico do berçário BFT. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Além disso, a manutenção de uma comunidade microbiana estável atua competitivamente contra o desenvolvimento de bactérias oportunistas, como as

do gênero *Streptococcus*, reduzindo drasticamente a dependência de intervenções quimioterápicas. Essa estabilidade zootécnica reflete-se na otimização do índice de conversão alimentar e na previsibilidade do ciclo, consolidando o sistema BFT não apenas como uma inovação biológica, mas como uma estratégia de gestão econômica indispensável para a viabilidade de sistemas superintensivos em nossa região.

5.1. Qualidade da água

A qualidade da água é um dos principais fatores que influenciam a sanidade dos peixes. Parâmetros como temperatura, oxigênio dissolvido, pH e concentração de compostos nitrogenados (amônia e nitrito) devem ser monitorados regularmente, preferencialmente de forma semanal. A manutenção de níveis adequados de oxigênio dissolvido (acima de 5 mg/L) e a estabilidade do pH contribuem para a redução do estresse fisiológico dos peixes (Boyd, 2015).



Figura 15. Variáveis críticas de controle no adensamento superintensivo: oxigênio dissolvido, pH e compostos nitrogenados. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

O acúmulo de matéria orgânica decorrente de sobras de ração e excretas favorece a deterioração da qualidade da água, elevando os níveis de amônia e nitrito, compostos tóxicos que comprometem a saúde dos animais (Tundisi;

Tundisi, 2008). Nesse sentido, recomenda-se o uso de estruturas como caixas de decantação e a renovação parcial da água, quando possível. Nesse contexto, a Figura 15 ilustra como esses parâmetros foram monitorados e controlados durante o experimento de adensamento, demonstrando a correlação direta entre o aumento da biomassa estocada e a variação da qualidade físico-química da água.

5.2. Manejo alimentar

O manejo alimentar adequado é essencial para evitar desperdícios e manter a qualidade da água. A oferta de ração deve ser ajustada à biomassa dos peixes e às condições ambientais, evitando o fornecimento excessivo (Kubitza, 2000). Rações de boa qualidade nutricional contribuem para o fortalecimento do sistema imunológico, aumentando a resistência dos peixes a agentes patogênicos.

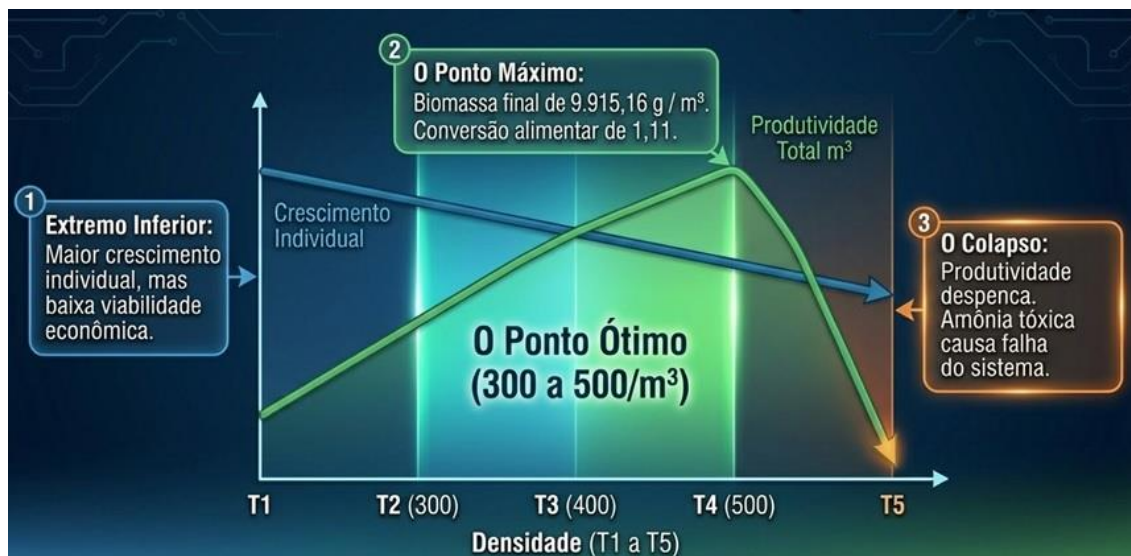


Figura 16. O ponto ótimo de produtividade (*sweet spot*). Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Essa eficiência nutricional é o que permite alcançar o ponto ótimo de produtividade (Figura 16). Sob a ótica da ecologia do sistema, o manejo preciso minimiza a lixiviação de fósforo e nitrogênio para a coluna d'água, prevenindo a eutrofização precoce e a consequente queda nos níveis de oxigênio noturno. Além disso, a utilização de dietas com alta digestibilidade reduz a carga de

sólidos suspensos e a excreção de amônia metabólica, o que alivia o esforço fisiológico dos peixes para manter a homeostase. Dessa forma, a nutrição deixa de ser vista apenas como um custo de produção e passa a atuar como uma ferramenta bioestatística, assegurando que o crescimento ocorra em harmonia com a capacidade de autodepuração do ecossistema de cultivo.

Além disso, o parcelamento da alimentação ao longo do dia é uma estratégia fundamental para otimizar a eficiência alimentar e reduzir drasticamente a carga orgânica instantânea no sistema de cultivo. Ao distribuir a oferta de nutrientes em múltiplas doses, evita-se a formação de picos pós-prandiais de excreção de amônia, mantendo os níveis de metabólitos nitrogenados em patamares seguros para a microbiota do sistema. Essa prática não apenas respeita o tempo de trânsito gastrointestinal da tilápia, maximizando a absorção de aminoácidos, como também minimiza o desperdício de ração que ocorreria por saturação da capacidade de ingestão em uma única oferta, assegurando a estabilidade hídrica necessária para a alta *performance* produtiva (Odhiambo *et al.*, 2020).

5.3. Densidade de estocagem

A densidade de estocagem deve ser compatível com o sistema de produção adotado. Altas densidades aumentam a competição por oxigênio e alimento, elevam o estresse e favorecem a disseminação de doenças (El-Sayed, 2006). Em sistemas intensivos, é fundamental que o aumento da densidade seja acompanhado por melhorias na aeração e no manejo da água. A superlotação é um dos principais fatores associados à ocorrência de surtos de estreptococose, devendo ser evitada como medida preventiva.

O sucesso da produção intensiva reside no equilíbrio entre a produtividade e o bem-estar animal. Como ilustrado na Figura 17, existe um limite biológico: neste caso, estabelecido em 500 peixes/m³, a partir do qual as trocas gasosas e a remoção de metabólitos não suprem mais as necessidades da biomassa estocada. Ultrapassar esse patamar resulta em uma queda drástica na imunidade dos peixes, criando um ambiente propício para a proliferação de

bactérias oportunistas e surtos infecciosos, o que caracteriza a "zona de risco" do adensamento excessivo.



Figura 17. Relação entre densidade de estocagem e limite biológico: impacto da superlotação (> 500 peixes/m³) na sanidade do sistema. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

5.4. Biosseguridade e controle sanitário

A biosseguridade na tilapicultura transcende a simples higiene; ela constitui um sistema de gestão de riscos focado em interromper as rotas de transmissão de patógenos (vírus, bactérias e parasitas). Segundo a OIE (2021), a eficácia dessas medidas depende da criação de barreiras sanitárias que isolem a unidade produtiva de vetores externos.

Além da certificação de alevinos e da quarentena, é indispensável o controle rigoroso da água de entrada e o monitoramento da fauna sinantrópica (aves e caracóis), que frequentemente atuam como hospedeiros intermediários de doenças. A desinfecção de equipamentos deve ser acompanhada pelo vazio sanitário entre safras, permitindo a quebra do ciclo biológico de agentes oportunistas que permanecem no sedimento dos tanques.

A restrição do acesso de pessoas e veículos não é apenas uma medida de isolamento, mas uma estratégia de controle de fômites¹⁸. Veículos que circulam

¹⁸ São objetos inanimados ou superfícies capazes de transmitir agentes infecciosos (vírus, bactérias, fungos) de um indivíduo para outro.

entre diferentes propriedades podem carregar patógenos em seus pneus e chassis, tornando o arco de desinfecção (rodolúvio) uma estrutura indispensável na entrada da propriedade. Essas camadas de proteção, quando integradas, garantem a sanidade do plantel e a previsibilidade econômica do ciclo produtivo.

5.5. Monitoramento sanitário

O acompanhamento diário do comportamento dos peixes é uma ferramenta simples e eficiente para a detecção precoce de enfermidades. Alterações como nado errático, redução do apetite, escurecimento da coloração e presença de lesões externas devem ser observadas com atenção (Figueiredo; Leal, 2012).

A remoção imediata de peixes doentes ou mortos é essencial para evitar a disseminação de patógenos. Em casos suspeitos, recomenda-se a busca por assistência técnica especializada para diagnóstico e orientação adequada.

5.6. Manejo ambiental e práticas agroecológicas

A adoção de práticas agroecológicas contribui para a melhoria da qualidade da água e para a sustentabilidade dos sistemas produtivos. A preservação e recuperação da vegetação no entorno dos viveiros e cursos d'água (matas ciliares) atuam na proteção das nascentes, na redução do assoreamento e no controle do escoamento superficial (Altieri, 2012; Souza, 2025; Souza et al., 2025).

A implantação de áreas de amortecimento, o uso de sistemas de decantação e o manejo adequado do solo no entorno dos viveiros são estratégias importantes para reduzir a entrada de sedimentos e contaminantes nos corpos hídricos. Essas práticas estão alinhadas com os princípios da Lei nº 9.433/1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, reforçando a necessidade de uso racional e sustentável da água (BRASIL, 1997).

5.7. Integração entre assistência técnica e capacitação

A capacitação contínua dos produtores é um dos pilares para a adoção eficiente das boas práticas de manejo. A atuação de instituições de pesquisa e

extensão rural é essencial para a difusão de tecnologias apropriadas e adaptadas à realidade local (EMBRAPA, 2018). A troca de experiências entre produtores, técnicos e instituições fortalece a atividade e contribui para a construção de sistemas produtivos mais resilientes e sustentáveis.

A eficácia da extensão rural reside na capacidade de simplificar processos complexos sem perder o rigor técnico. A Figura 18 sistematiza essa abordagem ao oferecer um *Checklist* Executivo voltado para a implantação imediata.

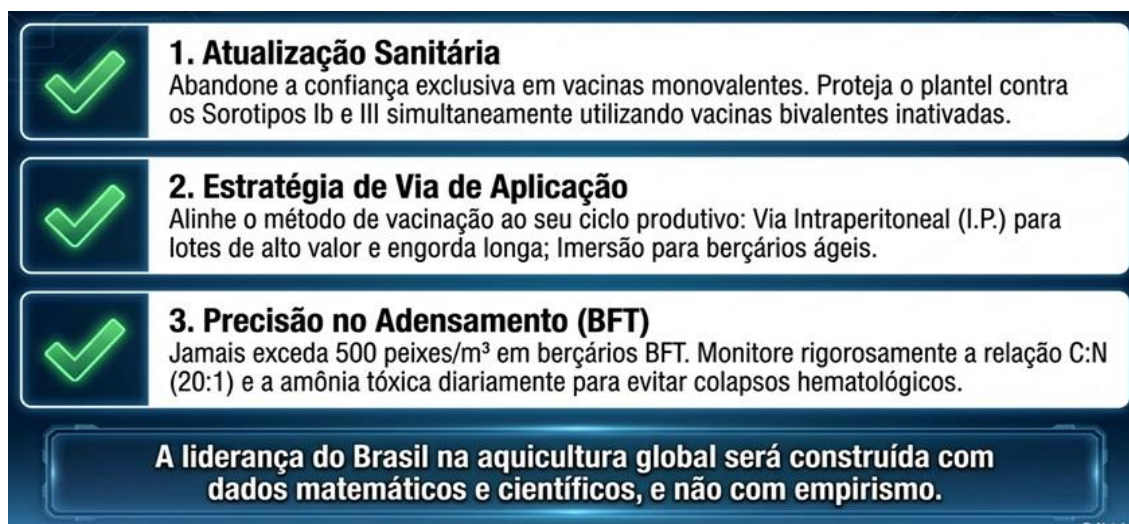


Figura 18. Guia executivo de campo: *checklist* para validação imediata de manejos sanitários e produtivos. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Esta ferramenta permite que o produtor e a assistência técnica avaliem, de forma objetiva, o nível de conformidade do sistema de cultivo em relação aos pilares de biossegurança e manejo, discutidos anteriormente, estabelecendo prioridades que garantam a viabilidade produtiva desde o primeiro ciclo de aplicação.

5.8. A tilapicultura do futuro: visão sistêmica e sustentabilidade

A consolidação de uma produção eficiente não depende de fatores isolados, mas da interação harmônica entre as variáveis biológicas e operacionais. Como demonstrado na Figura 19, a tilapicultura moderna exige uma abordagem multidimensional, onde a prevenção sanitária (biossegurança) se une à precisão técnica do manejo hídrico e alimentar. Essa "equação" define

o novo paradigma da atividade, no qual a produtividade é medida não apenas pelo volume final, mas pela capacidade de manter o sistema livre de patógenos e em equilíbrio com os recursos naturais.

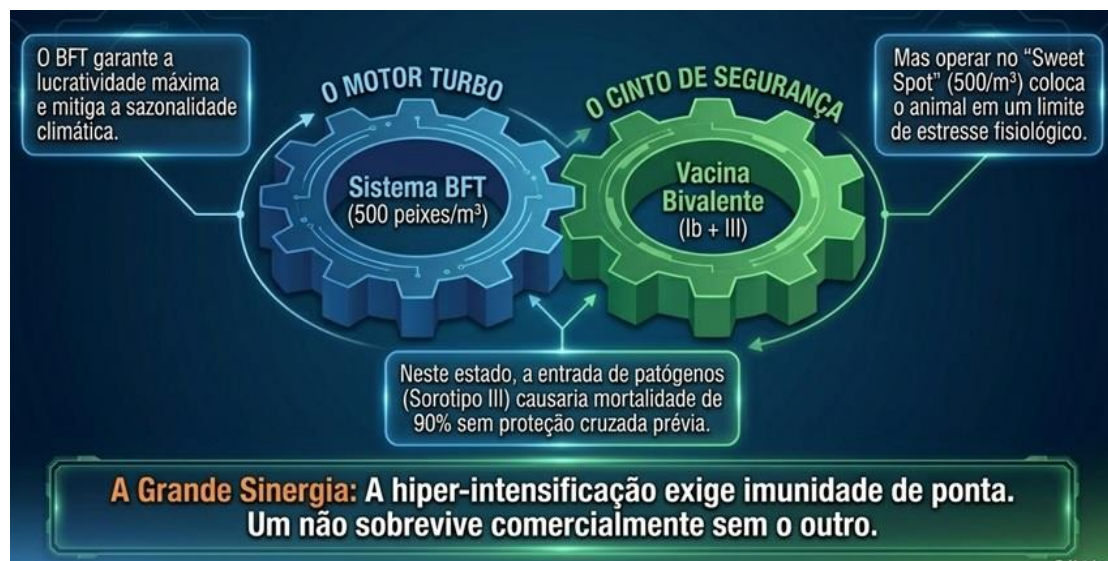


Figura 19. A nova equação aquícola regional: integração de tecnologias disruptivas e sustentabilidade para 2040. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

6. Considerações

A tilapicultura nos municípios de Alegre e Muniz Freire vem se consolidando como uma importante atividade para a agricultura familiar, contribuindo para a geração de renda e segurança alimentar. No entanto, o aumento da produção, especialmente em sistemas mais intensivos, tem trazido desafios sanitários relevantes, com destaque para as infecções bacterianas causadas por *Streptococcus agalactiae*, que podem provocar perdas significativas nos cultivos.

Os resultados discutidos mostram que muitos desses problemas estão diretamente ligados ao manejo adotado nas propriedades. Altas densidades de estocagem, excesso de ração, acúmulo de matéria orgânica e falhas no controle da qualidade da água aumentam o estresse dos peixes e favorecem o surgimento de doenças. Na prática, isso significa que o produtor precisa olhar a sanidade não apenas como tratamento, mas principalmente como prevenção no dia a dia da produção.

Nesse sentido, além da análise dos desafios sanitários, este trabalho contribui de forma aplicada ao apresentar um conjunto de boas práticas de manejo adaptadas à realidade regional, servindo como orientação técnica para produtores e agentes de extensão rural. Essas recomendações reforçam que a prevenção é o caminho mais eficiente e acessível para reduzir perdas produtivas.

Dessa forma, algumas medidas simples e eficientes podem ser adotadas nas propriedades. O monitoramento frequente da água (temperatura, oxigênio, pH e transparência), o controle da quantidade de ração fornecida e a manutenção de densidades adequadas são fundamentais para reduzir riscos. Além disso, retirar rapidamente peixes doentes ou mortos, evitar o excesso de manejo e realizar a limpeza periódica dos viveiros ajudam a diminuir a pressão de patógenos no sistema.

Do ponto de vista agroecológico, práticas que melhoram a qualidade da água e integram a produção ao ambiente devem ser incentivadas. A manutenção ou recuperação da vegetação ao redor dos viveiros e cursos d'água (matas ciliares) ajuda a proteger as nascentes, reduzir o assoreamento e melhorar a infiltração de água no solo. O uso de caixas de decantação para reter resíduos, o reaproveitamento de água quando possível e a redução do uso de insumos químicos também contribuem para um sistema mais equilibrado e sustentável.

Outro ponto importante é o cuidado com a origem dos alevinos e a adoção de medidas de biossegurança, como quarentena de novos lotes e desinfecção de equipamentos. A alimentação de qualidade também tem papel essencial, pois peixes bem nutridos são mais resistentes a doenças.

Além disso, é fundamental que a atividade esteja em conformidade com a Política Nacional de Recursos Hídricos, que orienta o uso responsável da água. Nesse sentido, a proteção das Áreas de Preservação Permanente (APPs), especialmente em torno de nascentes e córregos, não é apenas uma exigência legal, mas uma prática que garante água de melhor qualidade para a própria produção.

Por fim, reforça-se que o sucesso da tilapicultura na região depende da combinação entre bom manejo, cuidado com o meio ambiente e acesso à assistência técnica. A troca de conhecimento entre produtores, técnicos e

instituições como o Incaper é essencial para melhorar os sistemas produtivos, reduzir perdas e garantir uma atividade mais sustentável e lucrativa no longo prazo.

6. Referências

ABDALLAH, E. S. H. *et al.* *Streptococcus agalactiae* infection in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*): a review. **Biology**, v. 13, n. 11, p. 914, 2024.

AL-HUSSINEE, L. *et al.* Immunohistochemistry and pathology of multiple Great Lakes fish from mortality events associated with viral hemorrhagic septicemia virus type IVb. **Diseases of Aquatic Organisms**, v. 93, p. 117-127, 2011.

ALTIERI, M. A. **Agroecologia**: bases científicas para uma agricultura sustentável. 3. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2012.

ALY, S. M. *et al.* Comparative evaluation of antioxidant status, stress, and hepatorenal biomarkers in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultured in In-Pond raceway and traditional aquaculture systems. **Fish Physiology and Biochemistry**, v. 51, n. 4, p. 119, 2025.

ASSANE, I. M. *et al.* Diseases of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in Brazil: a review. **Aquaculture International**, [S. l.], v. 30, n. 4, p. 1917-1939, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10499-022-00881-2>. Acesso em: 11 abr. 2026.

AUSTIN, B.; AUSTIN, D. A. **Bacterial fish pathogens**: disease of farmed and wild fish. 6th ed. Cham: Springer, 2016.

AVNIMELECH, Y. **Biofloc technology**: a practical guide book. 3. ed. Baton Rouge: World Aquaculture Society, 2015.

BONDAD-REANTASO, M. G. *et al.* Economic impacts of aquatic animal diseases on aquaculture production: a review. **Reviews in Aquaculture**, [S. l.], v. 15, n. 3, p. 1240-1265, 2023.

BOYD, C. E. **Water quality**: an introduction. 2. ed. Cham: Springer, 2015.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União: Brasília, 1997.

BUJÁN, N.; TORANZO, A. E.; MAGARIÑOS, B. *Edwardsiella piscicida*: a significant bacterial pathogen of cultured fish. **Diseases of aquatic organisms**, v. 131, p. 59-71, 2018.

CAIN, K. The many challenges of disease management in aquaculture. **Journal of the World Aquaculture Society**, v. 53, n. 6, p. 1080-1083, 2022.

CARVALHO, E. C. **Identificação fenotípica e molecular de bactérias patogênicas associadas à criação de peixes amazônicos**. 2012. 134f (Mestre) - Programa de Pós-graduação em Genética, Conservação e Biologia Evolutiva, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus.

CASTILHO-BARROS, L. *et al.* Economic feasibility of tilapia culture in southern Brazil: A small-scale farm model. **Aquaculture**, v. 515, p. 734551, 2020.

CAUS, T. T. **Fomento à piscicultura**: Incaper presta apoio técnico ao Programa 'Mais Peixes' em Muniz Freire. 2023. Disponível em: <<https://incaper.es.gov.br/Not%C3%ADcia/fomento-a-piscicultura-incaper-presta-apoio-tecnico-ao-programa-mais-peixes-em-muniz-freire>>. Acesso em: 03 abr. 2026.

CHEW, X. Z. *et al.* Impact of transport conditions and underlying disease on post-stocking survival of juvenile Lates calcarifer. **Journal of Fish Diseases**, v. 47, n. 8, p. e13963, 2024.

CHIDEROLI, R.T. *et al.* Emergence of a new multidrug-resistant and highly virulent serotype of *Streptococcus agalactiae* in fish farms from Brazil. **Aquaculture**, v. 479, p. 45-51, 2017.

CLSI. **Methods of antimicrobial disk susceptibility testing of bacteria isolated from aquatic animals**: Approved guideline VET03-A. Wayne, PA: Clinical and Laboratory Standards Institute 2006.

COSTA, F. A. A.; LEAL, C. A. G.; LEITE, R. C. Genotyping of *Streptococcus dysgalactiae* strains isolated from Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.). **Journal of Fish Diseases**, v. 37, n. 5, p. 463-469, 2014.

DEAN, D. G.; JEFFREY A. DEAN; COULOMBIER, D. **Epi-Info, version 6**: a word processing database and statistics program for epidemiology on microcomputers. Atlanta: CDC 1994.

DEBNATH, S. C. *et al.* Tilapia aquaculture, emerging diseases, and the roles of the skin microbiomes in health and disease. **Aquaculture International**, v. 31, n. 5, p. 2945-2976, 2023.

DELPHINO, M.; JOSHI, R.; ALVAREZ, A. T. Economic appraisal of using genetics to control *Streptococcus agalactiae* in Nile tilapia under cage and pond farming system in Malaysia. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 8754, 2022.

DESHOTEL, M. B. *et al.* Bacteriophage endolysin treatment for systemic infection of *Streptococcus iniae* in hybrid striped bass. **Fish & Shellfish Immunology**, v. 145, p. 109296, 2024.

EL-NOBY, G. *et al.* Streptococcus: a review article on an emerging pathogen of farmed fishes. **Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries**, v. 25, n. 1, p. 123-139, 2021.

EL-SAYED, A. F. M. **Tilapia culture**. Cambridge: CABI Publishing, 2006.

ELSAYED, N. S. *et al.* Major bacterial challenges facing Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in Egyptian fish hatcheries. **Journal of Applied Veterinary Sciences**, v. 9, n. 2, p. 67-78, 2024.

EMAM, W.; LAMBERT, H.; BROWN, C. The welfare of farmed Nile tilapia: a review. **Frontiers in veterinary science**, v. 12, p. 1567984, 2025.

EMBRAPA. **Boas práticas de manejo na aquicultura**. Brasília: Embrapa, 2018.

EMBRAPA. **Sistema de bioflocos torna produção de tilápia mais sustentável**. Brasília, DF: Embrapa, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 12 abr. 2026.

FIGUEIREDO, H. C. P.; LEAL, C. A. G. Tecnologias aplicadas em sanidade de peixes. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 41, p. 8-14, 2012.

FIGUEIREDO, H. C.; LEAL, C. A. G. Infecções por *Streptococcus* spp. em peixes. In: SILVA-SOUZA, A. T.; LIZAMA, M. A. P. **Patologia e sanidade de organismos aquáticos**. Maringá: Editora ABRAPOA, 2012. cap. 12, p. 275-292.

FIGUEIREDO, H. C.P. *et al.* *Streptococcus iniae* outbreaks in Brazilian Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) farms. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 43, p. 576-580, 2012.

HAENEN, O. L. M. *et al.* Bacterial diseases of tilapia, their zoonotic potential and risk of antimicrobial resistance. **Reviews in Aquaculture**, v. 15, p. 154-185, 2023.

IREGUI, C. *et al.* Epidemiology of *Streptococcus agalactiae* and strepto-coccosis in tilapia fish (*Oreochromis* spp.). **Epidemiology I: Theory, Research and Practice**, p. 251-268, 2014.

JANTRAKAJORN, S.; MAISAK, H.; WONGTAVATCHAI, J. Comprehensive investigation of streptococcosis outbreaks in cultured Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, and red tilapia, *Oreochromis* sp., of Thailand. **Journal of the world aquaculture society**, v. 45, n. 4, p. 392-402, 2014.

JONES, N.; BOHNSACK, J. F.; TAKAHASHI, S. Multilocus sequence typing system for group B *Streptococcus*. **Journal of Clinical Microbiology**, v. 41, n. 6, p. 2530-2536, 2003.

JUÁREZ-CORTÉS, M. Z. *et al.* *Streptococcus iniae* in aquaculture: a review of pathogenesis, virulence, and antibiotic resistance. **International Journal of Veterinary Science and Medicine**, v. 12, n. 1, p. 25-38, 2024.

KAYANSAMRUJ, P. *et al.* Genomics-driven prophylactic measures to increase streptococcosis resistance in tilapia. **Journal of Fish Diseases**, v. 46, n. 6, p. 597-610, 2023.

KRONVALL, G.; KAHLMETER, G.; MYHRE, E. A new method for normalized interpretation of antimicrobial resistance from disk test results for comparative purposes. **Clinical Microbiology and Infection**, v. 9, n. 2, p. 120-132, 2003.

KUBITZA, F. Antecipando-se às doenças na tilapicultura. **Panorama da Aquicultura**, v. 15, n. 89, p. 15-23, 2005.

KUBITZA, F. **Tilápia: tecnologia e planejamento na produção comercial**. Jundiaí: Acqua & Imagem, 2000.

KUBITZA, F. **Tilápia: tecnologia e planejamento na produção comercial**. Jundiaí: F. Kubitza, 2005.

KUBITZA, F. Tilápias na mira dos patógenos. **Panorama da Aquicultura**, v. 18, n. 107, p. 28-37, 2008.

LAITH, A. A. *et al.* Molecular identification and histopathological study of natural *Streptococcus agalactiae* infection in hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus*). **Veterinary World**, v. 10, n. 1, p. 101, 2017.

LEAL, C. A. G.; TAVARES, G. C.; FIGUEIREDO, H. C. Outbreaks and genetic diversity of *Francisella noatunensis* subsp *orientalis* isolated from farm-raised Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in Brazil. **Genetics and Molecular Research**, v. 13, n. 3, p. 5704-5712, 2014.

LI, C. *et al.* Pathological progress of two types of nodules in *Micropterus salmoides* infected with *Nocardia seriolae*. **Fishes**, v. 9, n. 12, p. 515, 2024.

LIMA, F. R. S. *et al.* Suplementação da dieta de juvenis de tilápia do Nilo criados em tanques BFT. **Ciência Animal Brasileira**, v. 22, 2021.

LIU, Z. *et al.* Regime shifts in microbial and water quality dynamics in red tilapia ponds. **Microorganisms**, v. 13, n. 7, p. 1553, 2025.

MAHMOUD, A. M. *et al.* Impacts of streptococcal infection on Nile tilapia *Oreochromis niloticus* in Egyptian farms with special reference to diagnosis and prevention. **Benha Veterinary Medical Journal**, v. 44, n. 1, p. 71-78, 2023.

MIAN, G. F. *et al.* Aspects of the natural history and virulence of *S. agalactiae* infection in Nile tilapia. **Veterinary microbiology**, v. 136, n. 1-2, p. 180-183, 2009.

MIAN, G. F.; GODOY, D. T.; LEAL, C. A. G. Aspects of the natural history and virulence of *S. agalactiae* infection in Nile tilapia. **Veterinary Microbiology**, v. 136, n. 1-2, p. 180-183, 2009.

ODHIAMBO, E. *et al.* Stocking density induced stress on plasma cortisol and whole blood glucose concentration in Nile tilapia fish (*Oreochromis niloticus*) of lake Victoria, Kenya. **International Journal of Zoology**, v. 2020, n. 1, p. 9395268, 2020.

OIE. **Aquatic Animal Health Code**. Paris: World Organisation for Animal Health, 2021.

OLIVEIRA, E. G. de *et al.* Produção de tilápia: Mercado, espécie, biologia e recria. **Circular Técnica**, Teresina, v. 45, n. 1, p. 1-12, jun. 2007. Semestral. Disponível em: <http://www.embrapa.br>. Acesso em: 19 ago. 2018.

OSMAN, K. M. *et al.* Characterization and susceptibility of streptococci and enterococci isolated from Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) showing septicaemia in aquaculture and wild sites in Egypt. **BMC veterinary research**, v. 13, n. 1, p. 357, 2017.

OSMAN, K. M. *et al.* Characterization and susceptibility of streptococci and enterococci isolated from Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) showing septicaemia in aquaculture and wild sites in Egypt. **BMC veterinary research**, v. 13, n. 1, p. 357, 2017.

PAIXAO LEMOS, C. H. da *et al.* Effects of interaction between pH and stocking density on the growth, haematological and biochemical responses of Nile tilapia juveniles. **Aquaculture**, v. 495, p. 62-67, 2018.

PAREDES-TRUJILLO, A. I.; MENDOZA-CARRANZA, M. Streptococcosis in Nile tilapia farming: a severe yet overlooked health challenge in Mexico, a study case in Campeche, Mexico. **Bulletin of the European Association of Fish Pathologists**, v. 45, n. 2, 2024.

PAREDES-TRUJILLO, A.; MENDOZA-CARRANZA, M. A systematic review and meta-analysis of the relationship between farm management, water quality and pathogen outbreaks in tilapia culture. **Journal of Fish Diseases**, v. 45, n. 10, p. 1529-1548, 2022.

PAREDES-TRUJILLO, A.; MENDOZA-CARRANZA, M. A systematic review and meta-analysis of the relationship between farm management, water quality and pathogen outbreaks in tilapia culture. **Journal of Fish Diseases**, v. 45, n. 10, p. 1529-1548, 2022.

PASNIK, D.J. *et al.* Antigenicity of *Streptococcus agalactiae* extracellular products and vaccine efficacy. **Journal of Fish Diseases**, v. 28, n. 4, p. 205-212, 2005.

PATTERSON, M. J.; BARON, S. **Streptococcus**. Medical Microbiology. Galveston, TX, 1996.

PDEAG. **Plano de desenvolvimento da agricultura do ES**. Espírito Santo. 2024.

PEIXE BR. **Anuário 2025 da Piscicultura Brasileira**. São Paulo: Associação Brasileira da Piscicultura, 2025.

PEIXE BR. Associação Brasileira da Piscicultura. **Anuário Peixe BR da Piscicultura**. 2018. Disponível em: < <https://www.peixebr.com.br/anuario-peixebr-2018/>>. Acesso em: 20 mar. 2026.

PEREIRA, S. L. A.; CHAGAS, E. C.; MACIEL, P. O. Embrapa Amazônia Ocidental. **Agentes patogênicos de tambaquis cultivados, com destaque**

para registros em Rio Preto da Eva, AM. 2016. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1065466/1/Doc127fechado.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2026.

PHASUNON, R. *et al.* Improving the diagnosis of *Streptococcus iniae* using a novel probe-based qPCR assay combined with an enrichment step. **Journal of Fish Diseases**, v. 46, n. 12, p. 1391-1401, 2023.

POYART, C.; TAZI, A.; RÉGLIER-POUPET, H. Multiplex PCR Assay for Rapid and Accurate Capsular Typing of Group B Streptococci. **Journal of Clinical Microbiology**, v. 45, n. 6, p. 1985-1988, 2007

PRABU, E. *et al.* Tilapia—an excellent candidate species for world aquaculture: a review. **Annual Research & Review in Biology**, v. 31, n. 3, p. 1-14, 2019.

PRADEEP, P. J. *et al.* Evidence of vertical transmission and tissue tropism of Streptococcosis from naturally infected red tilapia (*Oreochromis spp.*). **Aquaculture Reports**, v. 3, p. 58-66, 2016.

Prefeitura municipal de Muniz Freire. **Lei nº 2.875, de 27 de agosto de 2025**, dispõe sobre o programa municipal + peixes e dá outras providências. 2025. Disponível em: <<https://spl.camaramunizfreire.es.gov.br/Arquivo/Documents/legislacao/html/L28752025.html>>. Acesso em: 03 abr. 2026.

QU, B. *et al.* Effects of low-light stress on aquacultural water quality and disease resistance in Nile tilapia. **PloS one**, v. 17, n. 5, p. e0268114, 2022.

RIBEIRO, D. **Fórum de piscicultura em Muniz Freire começa nesta quinta:** evento acontece entre quinta e sexta-feira, desta semana, no parque de exposições de Muniz Freire. 2024. Disponível em: <<https://aquinoticias.com/2024/03/forum-de-piscicultura-em-muniz-freire-comeca-nesta-quinta-14/>>. Acesso em: 03 abr. 2026.

SALAMA, N. K. G.; MURRAY, A. G. Farm size as a factor in hydrodynamic transmission of pathogens in aquaculture fish production. **Aquaculture Environment Interactions**, v. 2, p. 61-74, 2011.

SAMPAIO, S. **Piscicultura no Espírito Santo cresce 3% em 2025 e mantém trajetória de alta.** 2026. Disponível em: <<https://www.folhavoria.com.br/folha-business/piscicultura-no-espirito-santo-cresce-3-em-2025-e-mantem-trajetoria-de-alta/>> Acesso em: 03 abr. 2026.

SEBASTIÃO, F. A. *et al.* **Sanidade na Tilapicultura:** principais doenças e estratégias de manejo em sistemas intensivos. 2. ed. Jaboticabal: Funep, 2024.

SIAPEC 3. **Relatórios de Entradas - IDAF.** Espírito Santo. 2024.

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

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

SULE, H. A.; SABA, A. O.; YU, C. Y. **Streptococcosis in aquaculture: advances, challenges, and future directions in disease control and prevention**. arXiv preprint arXiv:2510.27354, 2025.

TAUKHID, T. *et al.* Streptococcosis on Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in Indonesian freshwater aquaculture. **Omni-Akuatika**, v. 19, n. 1, p. 1-14, 2023.

TAVARES-DIAS, M.; MARTINS, M. L. An overall estimation of losses caused by diseases in the Brazilian fish farms. **Journal of Parasitic Diseases**, 2014.

TORRES-CORRAL, Y.; SANTOS, Y. Development of a real-time PCR assay for detection and quantification of streptococcus iniae using the lactate permease gene. **Journal of fish diseases**, v. 44, n. 1, p. 53-61, 2021.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

VAN DOAN, H. *et al.* Streptococcosis a re-emerging disease in aquaculture: significance and phytotherapy. **Animals**, v. 12, n. 18, p. 2443, 2022.

WANG, B. *et al.* Strategies to enhance tilapia immunity to improve their health in aquaculture. **Reviews in Aquaculture**, v. 15, p. 41-56, 2023.

YANONG, R.P.E.; FRANCIS-FLOYD, R. Streptococcal infections of fish. Florida Cooperative Extension Service. **IFAS: University of Florida**, p. 1-5, 2002.

CAPÍTULO 8

Qualidade físico-química e microbiológica da água em bebedouro e poço artesiano em Alegre–ES: uma análise comparativa

Daniela Fosse Valbao, Kamilla Matos Boldrini, Carla Sardinha de Oliveira, Isabela Berbert da Guia, Willian Moreira da Costa, Atanásio Alves do Amaral, Maurício Novaes Souza

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-45-9.c8>

Resumo

A água é um recurso essencial à vida, desempenhando papel fundamental na saúde pública e no equilíbrio ambiental. Sua qualidade pode ser influenciada por fatores físicos, químicos e microbiológicos, além das condições dos sistemas de distribuição e armazenamento. Este estudo teve como objetivo avaliar parâmetros físico-químicos e microbiológicos de amostras de água coletadas em dois pontos distintos: um bebedouro do Ifes Campus de Alegre e um poço artesiano na comunidade de Chácara Portão, distrito de Rive, Alegre, ES. Foram analisados pH, temperatura, dureza total, alcalinidade, condutividade elétrica, turbidez, matéria orgânica, ortofosfato, amônia, nitrito e coliformes, com comparação aos padrões estabelecidos pela legislação vigente. Os resultados indicaram que pH, turbidez e dureza total atenderam aos limites recomendados. Contudo, a água do poço apresentou elevada condutividade elétrica, sugerindo maior concentração de sólidos dissolvidos e possível influência antrópica ou mineralização natural. A amostra do bebedouro apresentou concentração de matéria orgânica próxima ao limite recomendado, enquanto a presença de amônia na água do poço indica possível contaminação recente por matéria orgânica ou influência de atividades locais. As análises microbiológicas não detectaram coliformes no momento da coleta, embora haja histórico de contaminação no poço. Conclui-se que, apesar da conformidade de parte dos parâmetros, há indícios de alterações na qualidade da água, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo e de práticas adequadas de gestão dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Qualidade da água. Parâmetros físico-químicos. Contaminação hídrica. Saneamento. Potabilidade. Saúde pública.

1. Introdução

A água apresenta múltiplos significados simbólicos em diferentes culturas ao longo da história, sendo associada, desde as mais antigas tradições, a ideias de origem da vida, purificação e renovação. Por meio de mitos e sistemas religiosos, esse elemento natural adquiriu relevância não apenas material, mas também cultural e espiritual (Chevalier; Gheerbrant, 1988).

Sob a perspectiva científica, a água constitui um recurso essencial à vida, sendo sua qualidade e disponibilidade fatores determinantes para a saúde humana e para o desenvolvimento das sociedades. A relação entre saúde, saneamento e organização social consolidou-se historicamente a partir de demandas, sobretudo econômicas, uma vez que o controle de doenças sempre esteve associado à manutenção da produtividade e ao bem-estar coletivo. Nesse contexto, a implantação de políticas públicas voltadas ao abastecimento de água e ao saneamento básico tornou-se uma prioridade em escala global (Piterman; Greco, 2005; Souza, 2025).

Nos sistemas de distribuição, a qualidade da água potável pode sofrer alterações significativas entre a saída da estação de tratamento e o ponto de consumo. Assim, a água que chega aos usuários pode apresentar características distintas daquelas originalmente tratadas. Essas mudanças podem ocorrer em função de processos biológicos e químicos, bem como devido à perda de integridade das redes de distribuição (Deininger *et al.*, 1992).

Além disso, a mistura de águas provenientes de diferentes fontes pode influenciar de forma significativa a qualidade final do abastecimento. A irregularidade no fornecimento também pode favorecer a entrada de contaminantes, contribuindo para a introdução de agentes patogênicos no sistema (Barcelos *et al.*, 1998; Souza *et al.*, 2025).

Estudos recentes evidenciam que a presença de *Escherichia coli* em sistemas de abastecimento está frequentemente associada a práticas inadequadas de armazenamento e manuseio da água, bem como à deficiência na manutenção das redes de distribuição, aumentando o risco de surtos infecciosos e a disseminação de microrganismos resistentes (Silva; Macêdo, 2025).

Complementarmente, a detecção desse microrganismo pode estar relacionada à ineficiência nas etapas de tratamento, especialmente nos processos de desinfecção. Falhas operacionais, como dosagem inadequada de desinfetantes, tempo de contato insuficiente ou ausência de monitoramento contínuo, favorecem a persistência de patógenos na água distribuída. Dessa forma, a presença de *E. coli* constitui um importante indicador de falhas no tratamento e na segurança microbiológica da água (APHA, 2017; Ministério da Saúde, 2021).

Pesquisas indicam que grande parte das amostras de água coletadas em áreas rurais não atende aos padrões legais de potabilidade, representando riscos à saúde pública e à sustentabilidade dos recursos hídricos (Germano; Germano, 2001 *apud* Silva; Ueno, 2008). Nesse sentido, a avaliação contínua desses parâmetros não apenas permite diagnosticar a qualidade da água, mas também subsidia a formulação de políticas públicas e estratégias mais eficazes de saneamento.

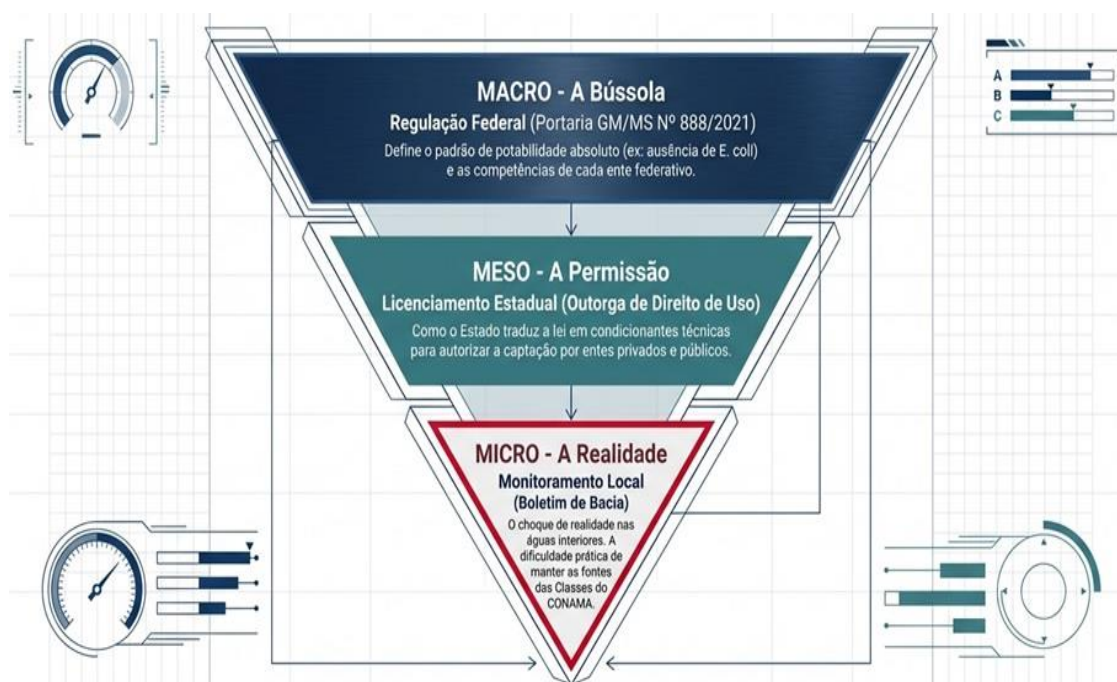


Figura 1. A tríade da governança hídrica. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Nesse contexto, a garantia da qualidade da água insere-se na tríade da governança hídrica, estruturada na articulação entre regulação federal,

licenciamento estadual e monitoramento local. A regulação em nível federal estabelece diretrizes, padrões de potabilidade e instrumentos normativos que orientam a gestão dos recursos hídricos e a proteção da saúde pública (Figura 1).

No âmbito estadual, o licenciamento ambiental exerce papel fundamental no controle das atividades potencialmente poluidoras, avaliando impactos e condicionando o uso dos recursos hídricos ao cumprimento de critérios técnicos e legais. Por sua vez, o monitoramento local, realizado por municípios, instituições de ensino e comunidades, possibilita o acompanhamento contínuo da qualidade da água, a identificação de fontes de contaminação e a implantação de ações corretivas em escala mais próxima da realidade territorial. A integração desses três níveis de atuação é essencial para a efetividade das políticas públicas, contribuindo para a prevenção de riscos sanitários e para a gestão sustentável dos recursos hídricos (Souza, 2025).

Por tais questões, a análise das características físico-químicas da água assume papel complementar e indispensável à avaliação microbiológica, permitindo a identificação e quantificação de espécies iônicas e compostos presentes no meio. Esses parâmetros contribuem para a compreensão tanto dos processos naturais quanto das alterações decorrentes de atividades antrópicas. O conhecimento dessas propriedades e de suas interações possibilita avaliar os níveis de risco associados à saúde humana e aos ecossistemas (Parron *et al.*, 2011). De acordo com Carmona *et al.* (2016), tais características influenciam diretamente os processos biológicos e químicos em ambientes aquáticos, além de impactarem a saúde pública quando não se encontram em conformidade com os padrões estabelecidos.

Diante dessa perspectiva integrada, que considera tanto os aspectos microbiológicos quanto físico-químicos na avaliação da qualidade da água, o presente trabalho teve como objetivo analisar e comparar parâmetros físico-químicos e microbiológicos de amostras de água coletadas em dois pontos distintos: um bebedouro do Ifes Campus de Alegre e um poço artesiano localizado na comunidade de Chácara Portão, zona rural do distrito de Rive, município de Alegre, ES.

2. Metodologia

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza aplicada, com abordagem quantitativa, fundamentada em revisão bibliográfica e análise experimental. Inicialmente, foram consultados artigos científicos disponíveis em bases de dados digitais, bem como obras especializadas relacionadas à qualidade da água e aos parâmetros físico-químicos e microbiológicos.

Posteriormente, foram realizadas análises laboratoriais de amostras de água coletadas em diferentes pontos, cujos resultados foram comparados com os padrões estabelecidos pela legislação vigente, com o objetivo de avaliar sua potabilidade e possíveis indícios de contaminação.

O trabalho foi estruturado em cinco etapas distintas (Figura 2). A primeira etapa consistiu em uma visita técnica ao laboratório, com a finalidade de definir os parâmetros a serem analisados e os procedimentos metodológicos a serem adotados. A segunda etapa envolveu a revisão da literatura e o aprofundamento teórico do tema. Na terceira etapa, procedeu-se à coleta das amostras de água, realizada em um mesmo período do dia, visando à padronização das condições de amostragem e à minimização de variações temporais.

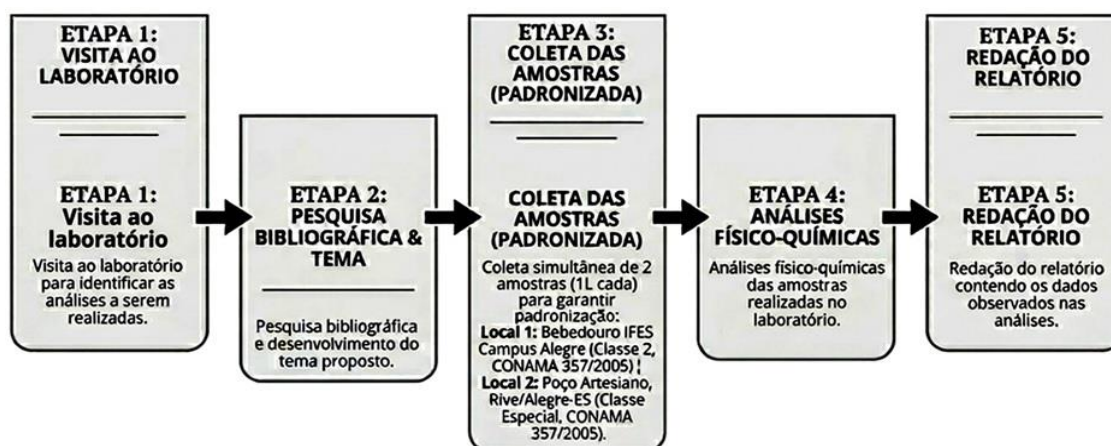


Figura 2. Fluxograma das etapas do trabalho. Fonte: Dados da pesquisa, 2024.

Para a coleta, foram utilizados recipientes plásticos com capacidade de 1 litro, previamente higienizados. Uma amostra foi coletada na torneira de um bebedouro localizado no Ifes Campus de Alegre (Figura 3), enquanto a outra foi

obtida de um poço artesiano situado na comunidade de Chácara Portão, zona rural do distrito de Rive, no município de Alegre, ES (Figura 4).



Figuras 3 e 4. Poço artesiano e bebedouro do Ifes. Fonte: Acervo Daniela Fosse, 2024.

A quarta etapa consistiu na realização das análises físico-químicas e microbiológicas em laboratório, seguindo procedimentos padronizados descritos na literatura especializada. Por fim, a quinta etapa compreendeu a organização, interpretação e análise dos dados obtidos, culminando na elaboração do presente trabalho.

3. Procedimentos

Os procedimentos analíticos adotados neste estudo foram conduzidos conforme metodologias padronizadas amplamente reconhecidas na literatura técnico-científica, com o objetivo de garantir a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados obtidos. As análises físico-químicas e microbiológicas foram realizadas em condições controladas de laboratório, seguindo protocolos específicos para cada parâmetro avaliado. Dessa forma, buscou-se assegurar a precisão das medições e a comparabilidade dos dados, permitindo uma avaliação consistente da qualidade da água nas amostras coletadas.

3.1. Temperatura

A temperatura da água foi determinada por meio de termômetro de imersão. Para a análise, uma alíquota da amostra foi transferida para um béquer com capacidade de 250 mL. O termômetro foi então imerso na amostra, permanecendo até a estabilização da leitura. A temperatura foi registrada com o bulbo ainda submerso, a fim de garantir maior precisão na medição.

3.2. Potencial hidrogeniônico (pH)

O potencial hidrogeniônico (pH) foi determinado utilizando-se um pHmetro devidamente calibrado. O equipamento foi ligado com antecedência mínima de 30 minutos para estabilização. Antes de cada leitura, os eletrodos foram lavados com água destilada e secos com papel absorvente.

A calibração do equipamento foi realizada com soluções tampão padrão (pH 4,0; 7,0 e, quando necessário, 9,0). Após a calibração, os eletrodos foram novamente higienizados e, em seguida, imersos na amostra para realização da leitura. Ao término das análises, os eletrodos foram lavados e mantidos imersos em solução apropriada, conforme recomendação do fabricante.

3.3. Dureza total

A dureza total da água foi determinada pelo método titulométrico com ácido etilenodiamino tetra-acético (EDTA). Para a análise, uma alíquota de 50 mL da amostra foi transferida para erlenmeyer de 250 mL, sendo realizadas determinações em duplicata.

Em seguida, foram adicionados 2 mL de solução tampão, com a finalidade de ajustar o pH da amostra para $10,0 \pm 0,1$. Posteriormente, adicionou-se aproximadamente 0,05 g do indicador negro de eriocromo T (Eriochrome Black T). A titulação foi realizada com solução de EDTA $0,01 \text{ mol L}^{-1}$, sob agitação contínua, até a mudança de coloração de púrpura-avermelhada para azul, caracterizando o ponto final da reação.

Paralelamente, foi realizada uma titulação em branco, utilizando água destilada, seguindo o mesmo procedimento experimental. O volume de EDTA

consumido na titulação do branco foi subtraído do volume gasto na titulação da amostra, para correção dos resultados.

A titulação foi conduzida em tempo inferior a cinco minutos após a adição da solução tampão, a fim de garantir a confiabilidade dos resultados.

3.4. Alcalinidade

A alcalinidade da água foi determinada por titulação ácido-base. Para a análise, uma alíquota de 50 mL da amostra foi transferida para erlenmeyer, à qual foram adicionadas três gotas da solução indicadora de verde de bromocresol/vermelho de metila.

A titulação foi realizada com solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0,02 N, até a mudança de coloração de azul-esverdeada para rósea, indicando o ponto final da reação. O volume total de ácido consumido foi registrado para posterior cálculo da alcalinidade.

Nos casos em que o pH da amostra apresentou valores superiores a 8,2, adicionaram-se previamente três gotas de fenolftaleína, realizando-se uma titulação inicial com ácido sulfúrico 0,02 N até o desaparecimento da coloração rósea. Em seguida, procedeu-se à titulação conforme descrito anteriormente, utilizando o indicador misto.

3.5. Condutividade elétrica

A condutividade elétrica foi determinada utilizando-se um condutivímetro previamente calibrado, conforme as instruções do fabricante. O equipamento foi ligado com antecedência mínima de 30 minutos para estabilização.

Antes da leitura, a amostra foi homogeneizada por agitação suave. Em seguida, o eletrodo foi imerso na amostra, aguardando-se a estabilização do valor para registro da condutividade elétrica. Os resultados foram expressos diretamente na unidade fornecida pelo equipamento, em microsiemens por centímetro ($\mu\text{S cm}^{-1}$).

3.6. Turbidez

A turbidez foi determinada por meio de turbidímetro devidamente calibrado, conforme recomendações do fabricante, com antecedência mínima de 30 minutos antes das análises.

As amostras foram previamente homogeneizadas por agitação suave e mantidas em repouso até a eliminação de bolhas de ar. Posteriormente, foram transferidas para a célula de leitura do equipamento, realizando-se a medição direta da turbidez, expressa em unidades nefelométricas de turbidez (NTU).

3.7. Matéria orgânica

A determinação da matéria orgânica foi realizada pelo método de oxidação com permanganato de potássio. Inicialmente, 100 mL da amostra foram transferidos para erlenmeyer de 250 mL, aos quais se adicionaram 10 mL de solução de permanganato de potássio (KMnO_4) $0,0025 \text{ mol L}^{-1}$ e 5 mL de solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) na proporção 1:3, seguido de agitação.

Paralelamente, foi preparada uma prova em branco, utilizando 100 mL de água destilada, com adição dos mesmos volumes de reagentes. Ambas as soluções foram aquecidas em banho-maria, a temperatura superior a 70°C , por 30 minutos.

Caso a coloração da mistura não permanecesse rósea após esse período, foram adicionados volumes adicionais da solução de permanganato até obtenção de coloração rósea persistente por, no mínimo, 30 segundos. Após o aquecimento, adicionaram-se 10 mL de solução de oxalato de sódio ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$) $0,00625 \text{ mol L}^{-1}$, mantendo-se a proporção equivalente ao volume de permanganato utilizado.

As amostras foram então mantidas por aproximadamente três minutos em aquecimento e, posteriormente, tituladas ainda quentes com solução de permanganato de potássio $0,0025 \text{ mol L}^{-1}$ até o aparecimento de coloração rósea persistente por 30 segundos, indicando o ponto final da reação.

3.8. Ortofosfato

A determinação do ortofosfato foi realizada pelo método colorimétrico do ácido ascórbico, baseado na formação de complexo fosfomolibdênico reduzido, com leitura em espectrofotômetro.

✓ Reagentes

Para a análise, foram preparados os seguintes reagentes:

a) Solução padrão estoque de fosfato: preparada a partir de fosfato monobásico de potássio (KH_2PO_4). Foram dissolvidos 0,1757 g do sal, previamente seco a 110 °C e resfriado em dessecador, em 1 L de água destilada. A solução foi armazenada em frasco de vidro âmbar sob refrigeração.

b) Solução de molibdato de amônio: obtida pela dissolução de 15 g de molibdato de amônio ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) em 500 mL de água destilada, sendo armazenada em frasco de plástico, ao abrigo da luz. A solução foi utilizada enquanto se manteve límpida.

c) Solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4): preparada pela diluição de 140 mL de ácido sulfúrico concentrado (P.A., aproximadamente 96–97%) em 900 mL de água destilada, com armazenamento em frasco de vidro âmbar.

d) Solução de ácido ascórbico: preparada diariamente pela dissolução de 1,35 g de ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) em 25 mL de água destilada.

e) Solução de tartarato de antimônio e potássio: preparada pela dissolução de 0,34 g de $\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$ em 250 mL de água destilada, sendo armazenada em frasco de vidro e utilizada enquanto se manteve estável e límpida.

✓ Reagente misto

O reagente misto foi preparado a partir da combinação dos reagentes descritos, conforme proporções previamente estabelecidas (Tabela 1). Quando não utilizado imediatamente, o reagente foi armazenado ao abrigo da luz, a fim de evitar degradação.

Tabela 1. Reagentes e volumes sugeridos na confecção de reagente misto para determinação do teor de ortofosfato

Reagente	Quantidade 1	Quantidade 2	Quantidade 3	Quantidade 4
Molibdato de amônio	25 ml	20 ml	10 ml	5 ml
H ₂ SO ₄ (diluído, guardado em geladeira)	62,5 ml	50 ml	25 ml	12,5 ml
Ác. Ascórbico ^(*)	25 ml	20 ml	10 ml	5 ml
Tartarato	12,5 ml	10 ml	5 ml	2,5 ml
Volume final (ml)	125	100	50	25
Quantidade de tubos	75	55	25	12

(*) Preparação do ácido ascórbico (C₆H₈O₆): diariamente dissolver 1,35 g de ácido ascórbico em 25 ml de água destilada.

Obs.: Caso o reagente misto não seja utilizado imediatamente, guarde-o no escuro.

✓ Procedimento analítico

Para a determinação de ortofosfato, alíquotas de 10 mL das amostras previamente filtradas foram transferidas para tubos de ensaio. Em seguida, adicionou-se 1,0 mL do reagente misto, procedendo-se à homogeneização da solução. Após um período de reação de 20 minutos, a absorbância foi determinada em espectrofotômetro, no comprimento de onda de 882 nm, utilizando-se como referência o branco analítico preparado com água destilada.

✓ Curva de Titulação

A determinação da concentração de ortofosfato foi realizada por método colorimétrico, utilizando a construção de uma curva analítica a partir de soluções padrão com concentrações conhecidas de fósforo. A relação entre a absorbância medida e a concentração de ortofosfato foi estabelecida por meio de regressão linear, permitindo a obtenção de uma equação de calibração. Essa equação foi posteriormente utilizada para calcular as concentrações de ortofosfato nas amostras analisadas, a partir dos valores de absorbância obtidos no espectrofotômetro (Figura 5).

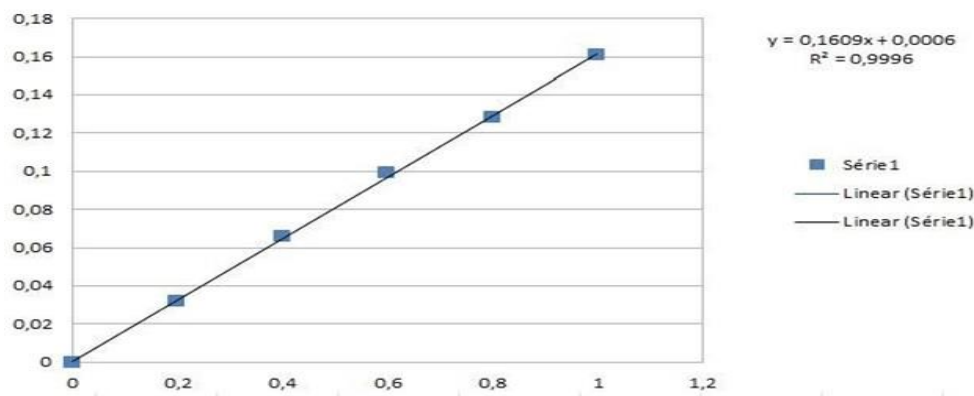


Figura 5. Curva de titulação. Fonte: Dados da pesquisa.

3.9. Amônia

A determinação de amônia foi realizada por método colorimétrico, com formação de composto indofenol, seguido de leitura espectrofotométrica.

✓ Reagentes e soluções padrão

a) Solução estoque de amônio: preparada a partir de sulfato de amônio $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$ a 10 mmol L^{-1} , mediante dissolução de 0,661 g do sal em 1 L de água destilada.

b) Soluções padrão para curva de calibração: inicialmente, foi preparada uma solução intermediária de $100 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$, pela diluição de 1 mL da solução estoque em balão volumétrico de 100 mL, completando-se o volume com água destilada. A partir dessa solução, foram preparadas diluições para obtenção das concentrações de 1, 5, 10 e $25 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$, além de uma solução branco contendo apenas água destilada.

c) Reagentes colorimétricos:

- Reagente A: preparado pela dissolução de 3,5 g de ácido fenólico e 0,04 g de nitroprussiato de sódio em 100 mL de água destilada.
- Reagente B: preparado pela dissolução de 2,8 g de citrato de sódio em aproximadamente 75 mL de água destilada, seguida da adição de 2,27 g de hidróxido de sódio (NaOH) e 5,6 mL de solução de hipoclorito, completando-se o volume para 100 mL com água destilada.

Os reagentes foram armazenados sob refrigeração, apresentando estabilidade por até 30 dias.

✓ **Procedimento analítico**

Para cada amostra, incluindo as soluções padrão e o branco, alíquotas de 5 mL foram transferidas para tubos de ensaio, sendo realizadas análises em triplicata. Em seguida, adicionaram-se 0,2 mL do reagente A, com posterior homogeneização e tempo de reação de 2 a 10 minutos.

Posteriormente, foram adicionados 0,2 mL do reagente B, procedendo-se novamente à homogeneização. As amostras foram mantidas em ambiente protegido da luz por um período mínimo de 1 hora e 30 minutos, para o desenvolvimento da coloração característica.

Após esse período, a absorbância foi determinada em espectrofotômetro, no comprimento de onda de 630 nm, utilizando-se o branco analítico como referência.

✓ **Curva de Titulação**

A determinação da concentração de amônia foi realizada por método colorimétrico, com base na formação de composto colorido proporcional à concentração de íons amônio presentes na amostra. Para isso, foi construída uma curva analítica a partir de soluções padrão com concentrações conhecidas, estabelecendo-se a relação entre absorbância e concentração por meio de regressão linear. A equação obtida foi utilizada para determinar as concentrações de amônia nas amostras analisadas, a partir das leituras espectrofotométricas realizadas (Figura 6).

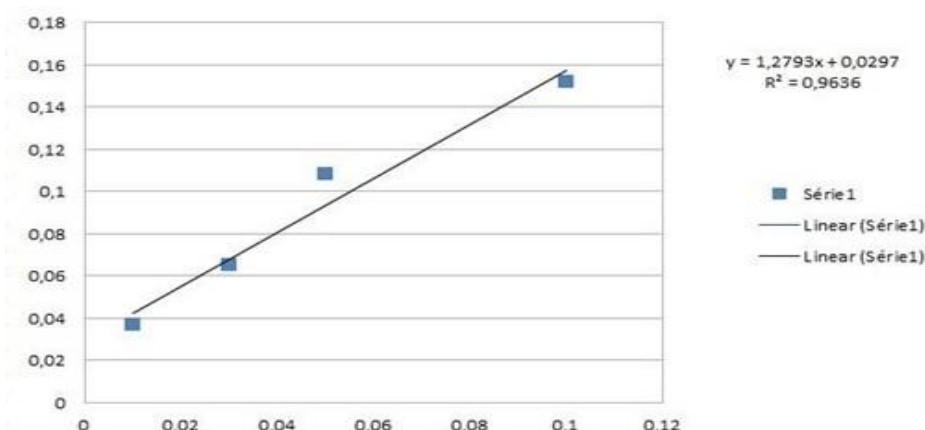


Figura 6. Curva de titulação. Fonte: Dados da pesquisa.

3.10. Nitrito

A determinação de nitrito foi realizada por método colorimétrico baseado na reação de diazotização com sulfanilamida, seguida de acoplamento com N-(1-naftil)etilenodiamina, formando um composto azoado mensurável por espectrofotometria.

✓ Reagentes e soluções padrão

a) Solução estoque de nitrito: preparada a partir de nitrito de sódio (NaNO_2) a 20 mmol L^{-1} , mediante dissolução de 0,138 g do sal em 1 L de água destilada.

b) Soluções padrão para curva de calibração: inicialmente, foi preparada uma solução intermediária de $20 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$, pela diluição de 1 mL da solução estoque em balão volumétrico de 100 mL, completando-se o volume com água destilada. A partir dessa solução, foram preparadas diluições para obtenção das concentrações de 0,4; 1,0; 2,0 e $5,0 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$, além de uma solução branco contendo apenas água destilada.

c) Reagentes colorimétricos:

- Solução de sulfanilamida: preparada pela dissolução de 0,5 g de sulfanilamida em aproximadamente 30 mL de água destilada, seguida da adição lenta de 5 mL de ácido clorídrico (HCl). Após resfriamento, o volume foi

completado para 50 mL com água destilada.

- Solução de N-(1-naftil)etilenodiamina: preparada pela dissolução de 0,1 g de N-(1-naftil)etilenodiamina di-hidrocloreto em 100 mL de água destilada.

✓ Procedimento analítico

Para cada amostra, incluindo as soluções padrão e o branco, alíquotas de 5 mL foram transferidas para tubos de ensaio, sendo realizadas análises em triplicata. Inicialmente, adicionaram-se 0,1 mL da solução de sulfanilamida, com posterior homogeneização e tempo de reação entre 2 e 10 minutos.

Em seguida, foram adicionados 0,1 mL da solução de N-(1-naftil)etilenodiamina, promovendo nova homogeneização. As amostras foram mantidas em repouso por um período de 20 a 30 minutos para o desenvolvimento da coloração.

A absorbância foi determinada em espectrofotômetro, no comprimento de onda de 540 nm, utilizando-se o branco analítico como referência.

✓ Curva de Titulação

A determinação da concentração de nitrito foi realizada por método colorimétrico, baseado na formação de um composto azoadado resultante da reação com reagentes específicos, cuja intensidade de cor é proporcional à concentração de nitrito presente na amostra. Para a quantificação, foi construída uma curva analítica utilizando soluções padrão com concentrações conhecidas, estabelecendo-se a relação entre absorbância e concentração por meio de regressão linear. A equação obtida foi utilizada para determinar as concentrações de nitrito nas amostras analisadas, a partir das leituras espectrofotométricas realizadas (Figura 7).

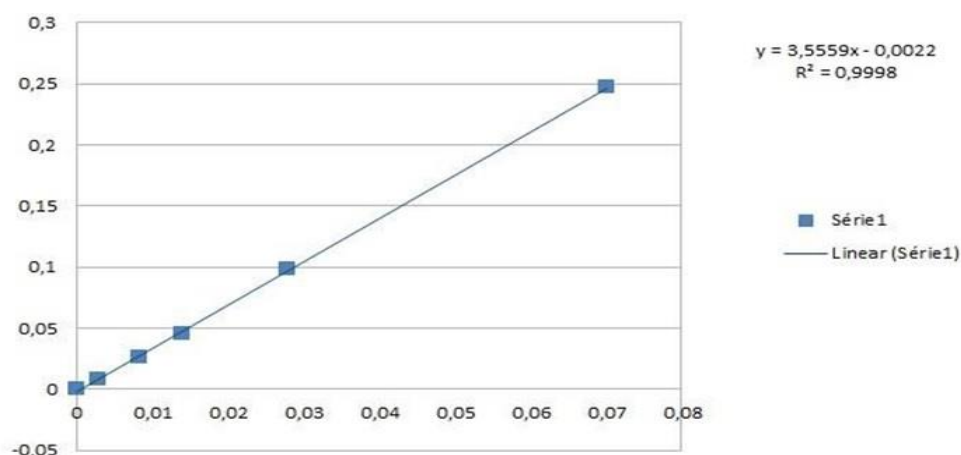


Figura 7. Curva de titulação. Fonte: Dados da pesquisa.

3.11. Coliformes

A análise microbiológica para detecção de coliformes totais e termotolerantes foi realizada pelo método dos tubos múltiplos, utilizando caldo lactosado como meio de cultura.

Para a análise, amostras de 100 mL de água foram coletadas em recipientes previamente esterilizados, sendo posteriormente inoculadas em séries de tubos contendo caldo lactosado, conforme protocolo padrão. As amostras foram incubadas em estufa bacteriológica à temperatura de 35–37 °C por um período de 24 horas.

Após o período de incubação, os tubos foram avaliados quanto à ocorrência de fermentação da lactose, indicada pela formação de gás e, ou, alteração de coloração do meio para tonalidade amarelada. A presença dessas características foi interpretada como resultado positivo para coliformes totais.

Os resultados foram expressos de forma qualitativa, como presença ou ausência de coliformes totais e de *Escherichia coli*, conforme os critérios estabelecidos para análise microbiológica da água.

4. Resultados e Discussão

A avaliação dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos das amostras analisadas permite compreender a qualidade da água nos diferentes

pontos de coleta, bem como identificar possíveis influências ambientais e antrópicas sobre esses sistemas.

Nesse sentido, a Tabela 2 apresenta os resultados obtidos nas análises laboratoriais realizadas nas amostras provenientes do bebedouro do Ifes Campus de Alegre e do poço artesiano localizado na comunidade de Chácara Portão, possibilitando uma comparação direta entre os valores observados e subsidiando a interpretação quanto à conformidade com os padrões de qualidade estabelecidos pela legislação vigente.

Tabela 2. Resultados apresentados nas análises

Parâmetro	Bebedouro (IFES)	Poço artesiano
Temperatura (°C)	23,2	26,3
pH	7,5	6,2
Dureza total (mg L ⁻¹)	16,6	10,6
Alcalinidade (mg L ⁻¹)	15,3	14,0
Condutividade (μS cm ⁻¹)	79,3	167,4
Turbidez (NTU)	0,02	1,08
Matéria orgânica (mg O ₂ L ⁻¹)	4,38	0,79
Ortofosfato (mg L ⁻¹ P)	0,0344	0,000
Amônia (mg L ⁻¹)	0,000	0,5067
Nitrito (mg L ⁻¹ N)	0,000	0,000
Coliformes	Ausência	Ausência

Fonte: Elaborado pelos autores, 2006.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 2, torna-se necessária a comparação sistemática desses dados com os valores de referência estabelecidos pela legislação vigente e por literatura técnica especializada. Essa

etapa é fundamental para avaliar a conformidade das amostras quanto aos padrões de qualidade da água e identificar possíveis desvios que possam indicar riscos à saúde humana ou impactos ambientais.

Nesse contexto, a Tabela 3 apresenta a análise comparativa dos parâmetros avaliados, permitindo uma interpretação mais criteriosa dos resultados obtidos e subsidiando a discussão acerca da potabilidade e das possíveis influências antrópicas sobre os recursos hídricos analisados.

Tabela 3. Resultados das análises comparados aos valores de referência

Parâmetro	Bebedouro (IFES)	Valor de referência ¹	Poço artesiano	Valor de referência ²
Temperatura (°C)	23,2	Não possui valor fixo; deve manter condições naturais do corpo hídrico	26,3	Não deve haver alteração significativa em relação às condições naturais
pH	7,5	6,0 – 9,0	6,2	6,0 – 9,0
Dureza total (mg L ⁻¹)	16,6	Não estabelecido pelo CONAMA (branda < 50; moderada 50–150; dura > 150)	10,6	Não estabelecido pelo CONAMA
Alcalinidade (mg L ⁻¹)	15,3	Não estabelecida; relacionada à capacidade tampão	14,0	Não estabelecida
Condutividade (µS cm ⁻¹)	79,3	Não estabelecida (valores > 100 podem indicar impacto)	167,4	Não estabelecida (valores elevados indicam impacto)
Turbidez (NTU)	0,02	Até 100 NTU	1,08	Deve manter condições naturais, com mínima alteração
Matéria orgânica (mg O ₂ L ⁻¹)	4,38	Até 5 mg O ₂ L ⁻¹	0,79	Até 3 mg O ₂ L ⁻¹
Ortofosfato (mg L ⁻¹ P)	0,0344	Lêntico: até 0,03; intermediário: até 0,05; lóxico: até 0,10	0,000	Não estabelecido; manter níveis naturais
Amônia (mg L ⁻¹ N)	0,000	pH ≤ 7,5: até 3,7; pH 7,5–8,0: até 2,0; pH 8,0–8,5: até 1,0; pH > 8,5: até 0,5	0,5067	Não estabelecido; esperado próximo de zero
Nitrito (mg L ⁻¹ N)	0,000	Até 1,0 mg L ⁻¹ N	0,000	Não estabelecido; esperado próximo de zero
Coliformes	Ausência	Até 1.000 NMP/100 mL (água potável: ausência total – Portaria GM/MS nº 888/2021)	Ausência	Esperado: ausência ou níveis muito baixos

¹ Classe 2 de água doce do CONAMA 357/2005

² Classe especial de água doce do CONAMA 357/2005

Fonte: Elaborado pelos autores, 2006.

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos nas análises laboratoriais, bem como sua comparação com os valores de referência estabelecidos pela legislação vigente. Para os parâmetros não contemplados diretamente pela Resolução CONAMA nº 357/2005, como dureza total, alcalinidade e condutividade elétrica, foram adotados critérios interpretativos com base em literatura técnica especializada, incluindo o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA) e relatórios da CETESB.

Para águas classificadas como Classe Especial, a Resolução CONAMA nº 357/2005 não estabelece limites numéricos para diversos parâmetros, priorizando a manutenção das condições naturais do corpo hídrico e a ausência de alterações decorrentes de atividades antrópicas. Nesse contexto, a interpretação dos resultados deve ir além dos valores absolutos, considerando também possíveis indícios de interferência ambiental (Figura 8).



Figura 8. Classes de enquadramento da qualidade da água, conforme critérios estabelecidos pela legislação ambiental brasileira. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Os valores de pH obtidos (7,5 para o bebedouro e 6,2 para o poço) encontram-se dentro da faixa estabelecida pela legislação (6,0–9,0), indicando conformidade quanto a esse parâmetro. A alcalinidade, embora não possua limite legal definido, apresentou valores baixos em ambas as amostras,

sugerindo reduzida capacidade tampão da água e, conseqüentemente, maior suscetibilidade a variações de pH (Parron *et al.*, 2011).

A dureza total, com valores de 16,6 mg L⁻¹ e 10,6 mg L⁻¹, caracteriza ambas as amostras como águas brandas. Embora esse parâmetro não represente risco direto à saúde, pode influenciar características organolépticas e processos industriais, além de estar associado à presença de íons cálcio e magnésio.

A condutividade elétrica apresentou valores distintos entre as amostras, sendo de 79,3 µS cm⁻¹ para o bebedouro e 167,4 µS cm⁻¹ para o poço artesiano. Embora não haja limite estabelecido pela legislação, valores superiores a 100 µS cm⁻¹ são frequentemente associados a ambientes com maior carga de sólidos dissolvidos. Dessa forma, o valor elevado observado no poço sugere possível influência de processos de lixiviação, aporte de sais minerais ou contaminação por fontes antrópicas. Contudo, é importante destacar que a condutividade, isoladamente, não torna a água imprópria para consumo, devendo ser analisada em conjunto com outros parâmetros.

Os valores de turbidez (0,02 NTU para o bebedouro e 1,08 NTU para o poço) encontram-se dentro dos padrões aceitáveis, indicando baixa presença de partículas em suspensão. Ressalta-se que, para água potável, a Portaria GM/MS nº 888/2021 estabelece valores mais restritivos (geralmente ≤ 5 NTU), sendo ambos os resultados considerados satisfatórios.

A concentração de matéria orgânica foi mais elevada na amostra do bebedouro (4,38 mg O₂ L⁻¹), aproximando-se do limite recomendado de 5 mg O₂ L⁻¹. Esse resultado pode indicar a presença de compostos orgânicos dissolvidos, os quais, durante processos de desinfecção, podem originar subprodutos potencialmente nocivos, como os trihalometanos¹⁹. Já a amostra do poço apresentou baixa concentração (0,79 mg O₂ L⁻¹), compatível com águas subterrâneas menos expostas à matéria orgânica.

A concentração de ortofosfato no bebedouro (0,0344 mg L⁻¹ P) está dentro dos limites estabelecidos para ambientes intermediários (até 0,05 mg L⁻¹ P), não indicando, isoladamente, risco imediato. Entretanto, a presença de fósforo,

¹⁹ Subprodutos químicos formados quando o cloro (usado na desinfecção) reage com matéria orgânica natural na água.

mesmo em baixas concentrações, pode contribuir para processos de eutrofização em ambientes aquáticos. A ausência de ortofosfato na amostra do poço sugere menor influência de fontes externas nesse parâmetro.

A presença de amônia na água do poço ($0,5067 \text{ mg L}^{-1}$) merece atenção, uma vez que esse composto, quando presente em águas naturais, pode indicar contaminação recente por matéria orgânica, esgoto doméstico ou fertilizantes agrícolas (Parron *et al.*, 2011). Apesar de não ultrapassar limites estabelecidos para determinadas faixas de pH, sua ocorrência reforça a hipótese de influência antrópica, especialmente considerando a proximidade de fossas sépticas na área de captação.

Por outro lado, a ausência de amônia na amostra do bebedouro indica maior estabilidade e eficiência no tratamento ou distribuição. Os resultados de nitrito foram nulos em ambas as amostras, o que é esperado, uma vez que esse composto geralmente ocorre como intermediário em processos de nitrificação e tende a apresentar baixa persistência em águas naturais.

Em relação à temperatura, as diferenças observadas são coerentes com as características das fontes analisadas, sendo a água do bebedouro submetida a resfriamento artificial, enquanto a água do poço reflete as condições térmicas do subsolo.

As análises microbiológicas indicaram ausência de coliformes totais e termotolerantes nas duas amostras, atendendo aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021. No entanto, o histórico de contaminação da água do poço sugere a necessidade de monitoramento contínuo, uma vez que a presença intermitente de coliformes pode indicar vulnerabilidade do sistema a contaminações pontuais.

De modo geral, os resultados evidenciam que, embora a maioria dos parâmetros esteja em conformidade com os padrões estabelecidos, a água do poço apresenta indícios de influência antrópica, especialmente em relação à condutividade elétrica e à presença de amônia. Esses achados reforçam a importância do monitoramento contínuo da qualidade da água, sobretudo em áreas rurais, onde práticas de saneamento inadequadas podem comprometer a segurança hídrica. A adoção de medidas preventivas e de gestão ambiental

adequada é fundamental para a proteção dos recursos hídricos e da saúde pública.

✚ Contextualização da qualidade da água na bacia do rio Itapemirim

A análise pontual das amostras avaliadas neste estudo ganha maior relevância quando inserida no contexto mais amplo da bacia hidrográfica do Rio Itapemirim, importante sistema hídrico do sul do Espírito Santo, que abastece populações urbanas e rurais e sustenta diversas atividades econômicas. Nesse sentido, dados provenientes do programa QualisRios evidenciam a distribuição espacial dos pontos de monitoramento da qualidade da água ao longo da bacia, permitindo identificar áreas mais suscetíveis à degradação e subsidiar ações de gestão (Pancotto *et al.*, 2025) (Figura 9).



Figura 9. Programa QualiRios ES e o monitoramento da bacia do rio Itapemirim. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

As informações apresentadas indicam que, em parte significativa das estações de monitoramento, houve piora no Índice de Qualidade da Água (IQA), revelando uma tendência preocupante de degradação ambiental (Pancotto *et al.*, 2025) (Figura 10).



Figura 10. IGA: média história versus média de 2024. Fonte: elaboração própria (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Esse cenário sugere que os impactos observados localmente, como os indícios de influência antrópica verificados na água do poço analisado, não constituem eventos isolados, mas refletem processos mais amplos associados ao uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica.

Adicionalmente, observa-se uma desconexão entre o arcabouço legal existente, que envolve instrumentos como licenciamento ambiental, enquadramento dos corpos hídricos e políticas de saneamento, e a realidade observada em campo. Apesar da existência de normas e mecanismos de controle, muitos cursos d’água continuam recebendo cargas de esgotos domésticos, além de sedimentos provenientes de áreas rurais degradadas, evidenciando fragilidades na implantação e fiscalização dessas políticas (Pancotto *et al.*, 2025) (Figura 11).

De acordo com Souza (2025), a degradação dos recursos hídricos está diretamente associada ao crescimento populacional, à urbanização e às atividades agropecuárias, evidenciando a necessidade de uma gestão integrada que contemple não apenas o uso da água, mas também o controle de fontes de poluição, como o saneamento inadequado. Essa perspectiva torna-se particularmente relevante no contexto da bacia do Rio Itapemirim, onde tais pressões antrópicas se manifestam de forma significativa ao longo do território.

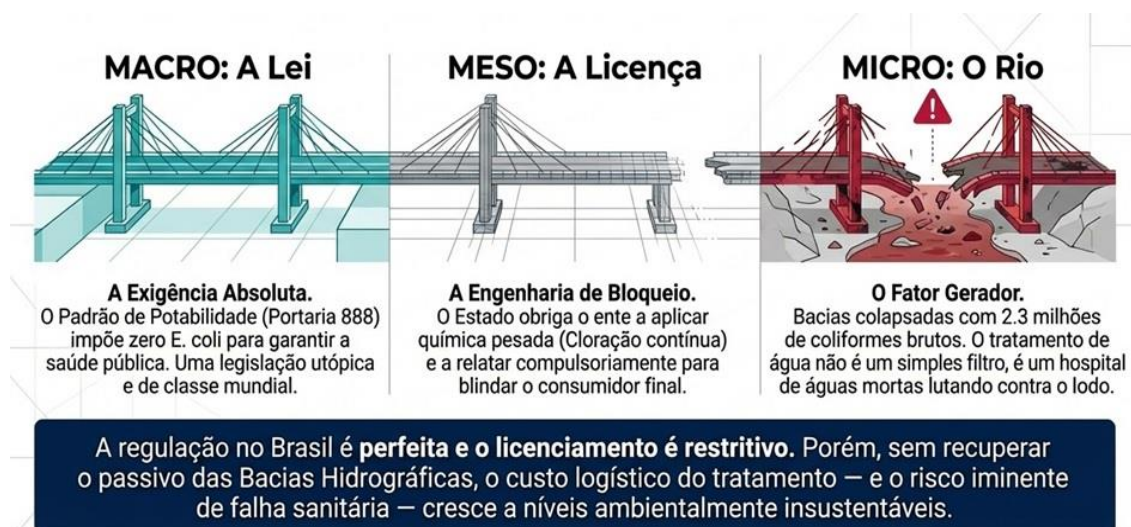


Figura 11. A fossa entre a legislação e a realidade. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Nesse cenário, destaca-se que a qualidade da água bruta na referida bacia apresenta um déficit crônico, o que impõe desafios adicionais aos sistemas de tratamento e abastecimento. Esse contexto reforça a necessidade de fortalecer a governança hídrica em múltiplas escalas, integrando monitoramento contínuo, fiscalização efetiva e adoção de práticas sustentáveis no meio rural, como estratégias agroecológicas de conservação do solo e da água. Dessa forma, a articulação entre dados locais e regionais torna-se fundamental para a compreensão dos processos de degradação e para a proposição de soluções mais eficazes e duradouras (Figura 12).



Figura 12. Diagnóstico final da governança hídrica. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

5. Considerações

A avaliação das propriedades físico-químicas e microbiológicas da água constitui ferramenta essencial para a compreensão do funcionamento dos ecossistemas aquáticos e para a identificação de fatores que podem comprometer a qualidade dos recursos hídricos. Nesse sentido, os resultados obtidos evidenciam que, embora parte dos parâmetros analisados esteja em conformidade com os padrões estabelecidos pela legislação vigente, há indícios de influência antrópica, especialmente na amostra proveniente do poço artesiano, o que reforça a necessidade de monitoramento contínuo e sistemático.

A qualidade da água está diretamente relacionada à promoção da saúde pública e à prevenção de doenças de veiculação hídrica. Assim, garantir o acesso à água potável, livre de contaminantes físicos, químicos e microbiológicos, é condição indispensável para assegurar qualidade de vida, sobretudo em comunidades rurais e em situação de maior vulnerabilidade. Nesse contexto, o monitoramento regular dos parâmetros de qualidade da água contribui não apenas para a redução de riscos à saúde, mas também para o fortalecimento de políticas públicas voltadas ao saneamento básico e à proteção ambiental.

Adicionalmente, a presença de nutrientes, como ortofosfato e compostos nitrogenados, ainda que em concentrações moderadas, pode desencadear processos de eutrofização em corpos hídricos, promovendo o crescimento excessivo de algas e a consequente redução do oxigênio dissolvido, com impactos negativos sobre a biodiversidade aquática. Esses processos estão frequentemente associados ao uso inadequado do solo, lançamento de efluentes e manejo incorreto de resíduos orgânicos.

Nesse cenário, destaca-se o potencial das práticas agroecológicas como estratégias fundamentais para a conservação da qualidade da água. Sistemas produtivos baseados na agroecologia, como o uso de adubação verde, manejo da matéria orgânica, implantação de sistemas agroflorestais e proteção de áreas de preservação permanente, contribuem para a redução da lixiviação de nutrientes, o controle da erosão e o aumento da infiltração de água no solo. Além disso, a substituição ou redução do uso de insumos químicos sintéticos diminui

significativamente os riscos de contaminação dos corpos hídricos superficiais e subterrâneos.

A análise integrada dos parâmetros avaliados permite, portanto, compreender não apenas a potabilidade da água, mas também as relações entre o uso e ocupação do solo e os impactos ambientais associados, especialmente em áreas rurais com presença de fossas sépticas e atividades agrícolas. Dessa forma, torna-se evidente a necessidade de adoção de práticas de manejo sustentável e de planejamento territorial que considerem a proteção dos recursos hídricos como elemento central.

Finalmente, ressalta-se a importância de investimentos em infraestrutura de saneamento, monitoramento ambiental e educação sanitária, aliados à promoção de práticas agroecológicas, como estratégias integradas para assegurar a segurança hídrica e o direito universal ao acesso à água de qualidade. Tais ações são fundamentais para a construção de sistemas produtivos mais sustentáveis e para a preservação dos ecossistemas em longo prazo.

6. Referências

American Public Health Association. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23. ed. Washington, D.C., 2017.

ARK, R. M.; HESS, A. F.; BERNSTAM, E. V. Animation and visualization of water quality in distribution systems. **Journal of the American Water Works Association**. n. 84, p. 48-52, 1992.

BARCELLOS, C.; COUTINHO, K.; PINA, M. F.; MAGALHÃES, M. M. A. E.; PAOLA, J. C. M. D.; SANTOS, S. M. Inter-relacionamento de dados ambientais e de saúde: Análise de riscos à saúde aplicada ao abastecimento de água no Rio de Janeiro utilizando sistemas de informações geográficas. **Cadernos de Saúde Pública**, n. 14, p. 597-605, 1998.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5/GM/MS, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 24 maio 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em: 25 mar. 2026.

CARMONA, E. C. *et al.* **Importância da água e suas propriedades para a vida.** Conexão Água, 2016. Disponível em: <<https://conexaoagua.mpf.mp.br/arquivos/artigos-cientificos/2016/09-importancia-da-agua-e-suas-propriedades-para-a-vida-1.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2025.

CETESB. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo 2023.** São Paulo: CETESB, 2024. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 30 mar. 2026.

CHEVALIER, J.; GHEERBRANT, A. **Dicionário de símbolos:** mitos, sonhos, costumes, gestos, formas, figuras, cores, números. Rio de Janeiro: José Olympio, 1988. p. 996.

CONAMA. **RESOLUÇÃO n.º 357 DE 17 DE MARÇO DE 2005.** Publicada no DOU nº 053, de 18/03/2005, p. 58-63. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>. Acesso em: 03 dez. 2016.

PANCOTTO, T. A.; MUNIZ, F.; FERRARI, J. L.; AMARAL, A. A. do; SOUZA, M. N. Bacia hidrográfica do rio Castelo, ES: integração entre conhecimento científico e educação para a sustentabilidade. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em gestão ambiental. Vol. IV.** Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. p. 243-271. ISBN: 978-65-84548-36-7. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-36-7>.

PARRON, L. M.; MUNIZ, D. H. de F.; PEREIRA, C. M. **Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química da água.** Embrapa Florestas. Colombo, PR, 2011.

SILVA, A. A.; UENO, R. M. Padrão físico-químico e microbiológico da água de nascentes e poços rasos de propriedades rurais da região sudoeste do Paraná. **Arquivos do Instituto Biológico, v. 82, 2015.** Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/aib/a/SmrRNS4dMx8VpgpcXWx85SP/>>. Acesso em: 22 jun. 2025.

SILVA, Q. M. A.; MACÊDO, J. V. L. Ocorrência de *Escherichia coli* em água potável e fatores associados: uma revisão integrativa. **Revista Sociedade Científica, v. 8, n. 1, p. 1069-1088, 2025.** Disponível em <https://doi.org/10.61411/rsc202597718>. Acesso em: 22 jun. 2025.

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

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

CAPÍTULO 9

Levantamento de indicadores econômicos e de contratos municipais de serviços de limpeza urbana do estado do Espírito Santo

Marcos Willians Campos de Almeida, Bruna Chaves Amaral, Welington Moreira da Silva, Dâmaris de Souza Guimarães, Salomão Martins de Carvalho Júnior, Maurício Novaes Souza

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-45-9.c9>

Resumo

Este estudo analisa indicadores econômicos e contratos municipais de limpeza urbana no Espírito Santo, investigando o gerenciamento do saneamento público e seus custos. Esses serviços são essenciais à saúde pública e à sustentabilidade, mas representam elevado investimento municipal, frequentemente agravado pela baixa arrecadação tarifária. Nesse contexto, a gestão ambiental e a agroecologia contribuem ao reduzir a geração de resíduos, estimular o reaproveitamento de matéria orgânica e valorizar ciclos naturais, diminuindo a pressão sobre os sistemas urbanos. A metodologia baseou-se em dados de portais de transparência e do SNIS. Os resultados indicam que o manejo de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) possui custo médio de 69,48 R\$/hab/ano, com destaque para a varrição, majoritariamente terceirizada. Práticas como coleta seletiva, compostagem e educação ambiental reduzem volumes destinados à disposição final, enquanto a agroecologia transforma resíduos em insumos produtivos, fortalecendo economias locais. Observou-se, ainda, falta de padronização contratual, dificultando a comparação e fiscalização dos gastos. Conclui-se que a padronização, aliada a práticas sustentáveis, é fundamental para aumentar a eficiência e promover a sustentabilidade na gestão pública.

Palavras-chave: Limpeza Urbana. Municípios. Contratos Públicos. Custos. Preservação do Meio Ambiente. Saúde humana.

1. Introdução

O crescimento acelerado da industrialização e do consumo, sobretudo o uso intenso de descartáveis (embalagens e materiais), tem desencadeado um contínuo aumento da produção de resíduos sólidos pela população (Figura 1). Assim, setores públicos e privados, que prestam serviços relacionados à gestão ou gerenciamento de resíduos têm buscado alternativas para solução desta demanda, inclusive impulsionando ao desenvolvimento de tecnologias.

Nos últimos anos, com o aumento populacional, surge a necessidade de mudanças significativas na gestão pública de resíduos e de limpeza urbana, levando os municípios a uma adaptação dos serviços de coleta e tratamento de resíduos visando atendimento às demandas ambientais de reciclagem e reutilização dos resíduos gerados (Benito-López *et al.*, 2011).



Figura 1. O custo exponencial do modelo linear de produção e consumo. Fonte: elaborado por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

Os serviços de limpeza urbana inseridos no saneamento básico incluem atividades como: varrição; capina e raspagem; roçagem; limpeza de bueiros; limpeza após realização de feiras; serviços de remoção; limpeza de praias; desobstrução de ramais e galerias; poda de árvores; pintura de guias, remoção de animais mortos, limpeza de cemitérios, entre outros (Monteiro *et al.*, 2001; Cempre, 2018).

A eficiência das atividades de limpeza e gestão de resíduos contribui para prevenção ou redução de problemas relacionados à saúde da população, principalmente devido à proliferação de vetores, contato com lixo acumulado e contaminação da água. A limpeza das ruas também interfere na estética da cidade, promove a segurança no trânsito, prevenindo acidentes, gerando orgulho e sentimento de pertencimento em seus habitantes, melhorando a aparência da comunidade, atraindo turistas e valorizando os seus imóveis (IBAM, 2001).

O município é demandado pela Constituição Federal, Art. 30, inciso V, como o responsável por prestar os serviços de manejo dos resíduos sólidos urbanos e realizar a Limpeza Urbana, esta definida na Lei Federal nº 12.305/2010. Da mesma forma, é de encargo do município organizar e prestar estes serviços públicos de acordo com o artigo 26 da lei, sendo sua competência reforçada no artigo 10 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 1998; BRASIL, 2010b) (Figura 2).

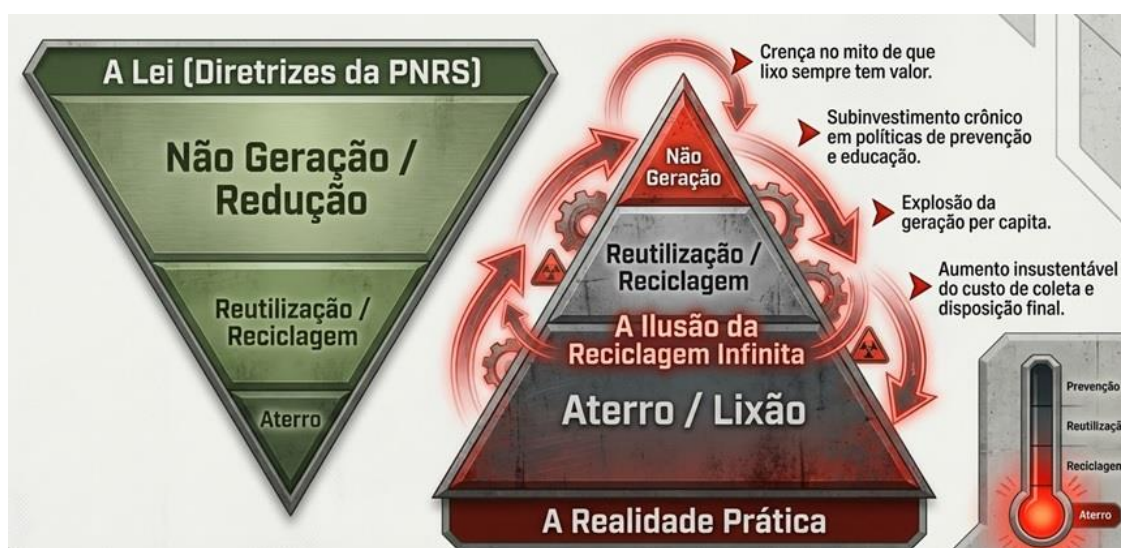


Figura 2. A pirâmide invertida: legislação *versus* realidade. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (NotebookLM).

A grande diversidade dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), o aumento do consumo e populacional, principalmente nas áreas urbanas, juntamente com a expansão das cidades e a falta de recursos suficientes para garantir a manutenção adequada dos resíduos, acarreta um crescente desafio para a administração pública na gestão do RSU (PWC, 2019).

Pesquisadores do bem estar urbano têm investigado como as variáveis ambientais afetam a eficiência na prestação de serviços de RSU (Carvalho; Dollery; Marques, 2015; Sarra; Mazzocchitti; Rapposelli, 2017; Halkos; Petrou, 2019.) e, também, como a eficiência e o custo da prestação do serviço estão relacionados com o tipo de prestador de serviço de RSU (propriedade pública ou privada) (Simões; Cruz; Marques, 2012; Simões; Marques, 2012; Pérez-López *et al.*, 2016; Romano; Molinos-Senante, 2020).

O Brasil enfrenta expressivas dificuldades na gestão de resíduos sólidos. Um exemplo notável é a variação na composição gravimétrica média dos RSU, que apresenta grande diversidade entre as regiões do país devido às diferenças nos costumes e características de consumo e descarte da população local (ABRELPE, 2011).

Outros problemas relevantes relacionados são: a baixa quantidade de pessoas qualificadas para elaboração e realização das atividades de gestão de resíduos; a falta de informações técnicas determinantes para a tomada de decisões; a ausência de planos municipais coerentes com o contexto regional. A escassez de informações técnicas que provocam falhas na elaboração de projetos e editais, e resultam na deficiência dos serviços prestados e em prejuízos econômicos e ambientais (TCERS, 2019).

Com a falta de recursos para a área de saneamento, os municípios do Brasil encontram um desafio para colocar em prática todas as atividades referentes aos serviços de Limpeza Urbana (LU). A Lei nº 12.305/2010, art. 18, indica como forma de obtenção de recursos da união e das entidades federais de crédito, a criação de Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, a qual sua elaboração é obrigação dos municípios, conforme previsto no Art. 18º da Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010b).

Diante deste cenário, apresenta-se um desafio no contexto da gestão municipal dos RSU. Nesse sentido, com foco na LU, a proposta deste trabalho mostra-se em consonância com as políticas públicas ambientais e de saneamento básico, tanto no contexto nacional como local. Por intermédio do levantamento e processamentos de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento e pesquisa de contratos de LU, será feita uma caracterização

sobre como os municípios realizam a gestão dos serviços de limpeza pública, com foco na parte financeira.

O principal objetivo do presente capítulo é o de realizar o levantamento de indicadores econômicos e de contratos municipais de serviços de LU do estado do Espírito Santo, utilizando-se o SNIS e dados de contratos de empresas privadas. Os objetivos específicos delimitados são: pesquisar e identificar os principais serviços de LU prestados pelos municípios do Espírito Santo; analisar os dados históricos dos municípios em relação aos custos dos serviços de LU; e pesquisar e averiguar os contratos de LU dos municípios do estado do Espírito Santo, no tocante as suas características de contratação.

2. Aspectos legais

Os serviços de LU, abastecimento de água, coleta e tratamento de esgoto e drenagem urbana são serviços de saneamento que necessitam de gerenciamento e manutenção, pois estão relacionados ao desenvolvimento, meio ambiente e principalmente, à saúde e educação no País (Couto *et al.*, 2017). As principais legislações que retratam sobre o gerenciamento de resíduos no Brasil e no estado do Espírito Santo (ES) estão resumidas na Tabela 1.

A Lei Federal nº 11.107/2005, permite, de forma jurídica, a cooperação entre os responsáveis pelo serviço público de limpeza a fim de promover ações conjuntas para benefício coletivo no qual, o objetivo seja obter ganho de escalas com qualidade de serviço e redução de custo. Os entes consorciados destinarão pessoal e bens essenciais à execução dos serviços transferidos (BRASIL, 2005).

Por outro lado, a Lei Federal n.º 11.445/2007 reforçou a necessidade da regulação dos serviços públicos relativos ao saneamento e, dentre seus objetivos, destacam-se: o estabelecimento de padrões e normas técnicas, econômicas e financeiras para que a prestação dos serviços ocorra da maneira apropriada; definição de tarifas e mecanismos de pagamento; garantia do cumprimento das ações e metas (BRASIL, 2007b).

Tabela 1. Leis federais que disciplinam o gerenciamento dos resíduos sólidos no Brasil

Lei	Decreto	Resumo
<u>Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.</u>	<u>Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022</u>	Estabelece a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, que dita as regras para seu gerenciamento, através de uma gestão integrada e uma responsabilidade compartilhada à cerca dos resíduos, inclusive da execução dos serviços de LU, na responsabilidade do gerador e do Poder Público.
<u>Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007.</u>	Decreto nº 7.217, de 21 de junho de 2010.	Consiste em um marco regulatório do saneamento, prevendo a integração dos serviços de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, proporcionando um aspecto intersetorial ao planejamento do saneamento básico
<u>Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005.</u>	<u>Decreto nº 6.017, de 17 de janeiro de 2007.</u>	Dispõe sobre as regras que possibilita a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios, realizarem uma gestão associada de objetivos de interesse comum (inclusive os RSU), através da criação de consórcios públicos, a fim de se ter uma redução dos custos.
Lei nº 9.264 de 15 de julho de 2009	-	Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos do estado do Espírito Santo, e descreve os elementos de gestão e gerenciamento dos resíduos gerados nos limites de suas circunscrições.

Fontes: BRASIL, 2007a; BRASIL, 2007b; ESPÍRITO SANTO, 2009; BRASIL, 2010a; BRASIL, 2010b; BRASIL, 2022.

Instituída pela Lei Federal nº 12.305/2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) objetiva regularizar e universalizar a prestação dos serviços de limpeza e manejo de resíduos urbanos. Tal propósito é viabilizado por mecanismos de gestão que asseguram a recuperação de custos, em consonância com a Lei nº 11.445/2007. Esta norma estabelece que o gerenciamento de resíduos deve integrar dimensões econômicas, sociais e de saúde pública, garantindo a sustentabilidade operacional e financeira do sistema (BRASIL, 2010b).

A coleta e a disposição final de resíduos domésticos urbanos competem ao Município, que pode executá-las diretamente ou por meio de terceirização. Conforme o Art. 10 da Lei Federal nº 12.305/2010, a gestão dos resíduos sólidos é de responsabilidade do Distrito Federal e dos municípios em seus respectivos territórios. O Art. 26 da mesma norma reforça que a titularidade das atividades

de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos impõe ao ente federado o dever de viabilizar sua execução (TCERS, 2019).

Além disso, o Art. 18, inciso XIII, da referida Lei, exige que o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) apresente detalhadamente o sistema de cálculo de custos e a modalidade de cobrança dos serviços, em conformidade com a Lei nº 11.445/2007 (BRASIL, 2010b). Contudo, a análise de diversos PMGIRS revela que tal exigência costuma ser abordada superficialmente ou até negligenciada pelas administrações municipais.

O Plano Estadual de Resíduos Sólidos atua como o principal instrumento de planejamento do setor no Espírito Santo, visando ao fortalecimento da gestão de resíduos. A estratégia adotada busca incentivar o aprimoramento administrativo das esferas municipal e estadual na execução de políticas públicas, prevendo, ainda, um programa de capacitação técnica e gerencial contínuo para os gestores envolvidos (SEAMA, 2019).

Quanto à prestação dos serviços, Bel e Warner (2008) destacam três modalidades principais: (1) a privada, caracterizada pela contratação individual de empresas pelos consumidores; (2) a pública, em que a administração detém a propriedade e a operação do sistema; e (3) a híbrida, fundamentada em parcerias público-privadas, nas quais o patrimônio público associa-se à operação técnica privada.

3. Panorama da gestão dos resíduos sólidos no ES

Segundo o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Espírito Santo (PERS/ES), a geração de RSU no estado alcançou cerca de 861.308 toneladas em 2017 (SEAMA, 2019). Quanto à governança, a administração pública direta detém a titularidade da gestão em 92% dos municípios, enquanto o restante divide-se entre empresas públicas (3%), sociedades de economia mista (3%) e autarquias (2%). Contudo, há um contraste entre titularidade e execução: 38% das municipalidades terceirizam mais de 50% dos serviços de coleta, e o setor privado absorve 83% dos gastos anuais com varrição e coleta (BRASIL, 2020).

Predomina no estado a execução direta de serviços como varrição, limpeza de vias, capina e coleta convencional, especialmente em cidades menores.

Nota-se, porém, uma correlação direta entre o aumento da densidade populacional e a terceirização de etapas críticas, como o transporte e a disposição final dos resíduos. Nesse cenário, 78% das administrações municipais operam sob um modelo compartilhado com empresas terceirizadas (SEAMA, 2019).

De acordo com a SEAMA (2019), os entraves à gestão e ao manejo de resíduos sólidos urbanos nos municípios capixabas, listados em ordem crescente de recorrência, abrangem desde a falta de incentivos tributários e conhecimento técnico até a ausência de padronização cadastral e deficiências legislativas. Somam-se a isso a fiscalização precária, o baixo apoio popular, o elevado custo operacional e a falta de recursos materiais e financeiros. No que tange às etapas específicas do gerenciamento, o armazenamento lidera como o principal gargalo (28%), seguido pela disposição final (22%), coleta (20%), transbordo (16%), transporte (8%) e destinação (6%).

4. Custos dos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos

Conforme a Lei nº 11.445/2007 (Art. 3º, I, "c"), a Limpeza Urbana e o Manejo de Resíduos Sólidos compreendem um conjunto de atividades essenciais à salubridade e à estética das cidades. O escopo legal abrange desde a varrição manual e mecanizada até as etapas de transbordo, transporte, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos domiciliares e de varrição (BRASIL, 2007b).

Para Monteiro *et al.* (2001), o sistema deve integrar sustentabilidade ambiental e bem-estar social, exigindo modelos de gestão que equilibrem eficiência e qualidade. Essa necessidade de revisão administrativa tornou-se imperativa na última década, impulsionada por pressões econômicas e sanitárias (Jacobsen *et al.*, 2013).

Relacionado à estrutura de custos, observa-se uma dinâmica distinta entre os serviços: enquanto a coleta é intensiva em capital (equipamentos e veículos), respondendo por metade dos gastos, a limpeza urbana (varrição) é intensiva em mão de obra. No cenário brasileiro, a manutenção desse sistema integrado

compromete uma parcela significativa das receitas municipais, variando entre 7% e 15% do orçamento total (Monteiro *et al.*, 2001).

Os Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) condicionam o acesso dos municípios aos recursos da União, ou por ela controlados, destinados à limpeza urbana e ao manejo de resíduos sólidos. Tais planos também são requisitos para a obtenção de incentivos ou financiamentos junto a entidades federais de crédito ou fomento. No conteúdo desses planos, deve constar o diagnóstico da situação atual da gestão, bem como as perspectivas e propostas para o cenário futuro (BRASIL, 2010b).

Diante dos elevados custos de limpeza pública e manejo de resíduos no Brasil, tanto a Política Nacional de Resíduos Sólidos quanto a Lei do Saneamento Básico estabelecem que a sustentabilidade financeira deve ser garantida por meio da cobrança de taxas ou tarifas (BRASIL, 2007b; BRASIL, 2010b).

A tarifa é um preço público cobrado por um serviço prestado, sendo devida quando há utilização efetiva, mensurável e com usuário definido. Já a taxa é um tributo vinculado à disponibilidade de um serviço público específico e divisível, instituído independentemente do uso efetivo. O valor da taxa é calculado conforme o potencial de uso e o número de contribuintes (Monteiro *et al.*, 2001).

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), 44,8% dos municípios da amostra cobram pelos serviços, sendo que o valor arrecadado cobre pouco mais da metade dos custos (57,2%). A modalidade de cobrança mais comum é a taxa específica no boleto do IPTU, adotada por 1.386 municípios (83,3% dos casos). Em seguida, aparece a taxa específica na fatura de água, com 11,1% de incidência (185 casos) e, por fim, a cobrança via boleto específico, presente em apenas 5,3% dos municípios amostrados, totalizando 85 casos (BRASIL, 2020).

No cenário regional, a SEAMA (2019) aponta que, no Espírito Santo, 36 dos 63 municípios participantes do levantamento do SNIS declararam não realizar qualquer tipo de cobrança pelos serviços de gestão de resíduos sólidos urbanos. Dos 27 municípios que aplicam cobranças, a maioria utiliza taxas no

boleto do IPTU (89%), seguida pela cobrança na conta de água (7%) e por boletos específicos (4%).

Segundo Dutra *et al.* (2018), mesmo nos municípios que realizam a cobrança, os recursos obtidos são frequentemente insuficientes para cobrir as despesas. Isso evidencia uma limitação orçamentária para arcar com os custos de operação, manutenção e investimentos, o que se torna um empecilho à sustentabilidade da gestão de resíduos.

Atualmente, os recursos aplicados pelos municípios totalizam cerca de R\$ 27,3 bilhões anuais, o que representa R\$ 10,75 por habitante/mês (ou R\$ 0,36 por habitante/dia) para custear os serviços de LU e manejo de RSU. Esse valor é considerado insuficiente e influencia negativamente os indicadores apresentados no Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2021).

A execução dos serviços de limpeza pública e manejo de resíduos sólidos representa um dos maiores investimentos das administrações municipais brasileiras. Entretanto, a maioria delas enfrenta baixa arrecadação. Parte dessa dificuldade em instituir a cobrança reside na complexidade de aferir o valor da taxa ou tarifa, devido ao desconhecimento dos elementos que compõem os custos reais dos serviços (Nascimento; Coimbra, 2017).

O custo do gerenciamento de resíduos sólidos é complexo, sendo influenciado por fatores como população, densidade e área do município, além da quantidade, qualidade e composição dos resíduos. Somam-se a isso as despesas com coleta, transporte e mão de obra (Karam *et al.*, 1988; Gellynck; Verhelst, 2007). O controle das despesas e o cálculo dos custos de produção permitem gerenciar adequadamente os recursos humanos e materiais, fundamentar o valor da taxa ou tarifa e planejar os gastos com base no orçamento anual municipal (D'almeida; Vilhena, 2000).

Embora a questão legal da cobrança esteja resolvida, ainda subsistem desafios significativos. É necessário que os municípios instituam sistemas de financiamento específicos e adotem modelos de cobrança adaptáveis a diferentes realidades locais. Além disso, a capacitação dos gestores municipais é fundamental para assegurar uma administração eficiente e evitar que as atividades relacionadas aos resíduos sólidos se tornem deficitárias (IPEA, 2012).

5. Principais serviços de limpeza urbana

Essenciais para a salubridade das cidades e a mitigação de impactos ambientais, os serviços de limpeza urbana abrangem o gerenciamento completo dos resíduos: da coleta à disposição final. Além do manejo de resíduos, essas operações incluem a manutenção da higiene pública e a conservação do mobiliário urbano. Nesse contexto, tais serviços desempenham papel estratégico na prevenção de doenças, no controle de vetores e na melhoria da qualidade de vida da população, especialmente em áreas urbanas densamente ocupadas. Ademais, contribuem diretamente para a redução da poluição do solo, da água e do ar, ao evitar o descarte inadequado de resíduos e promover sua destinação ambientalmente adequada.



Figura 3. Fluxo do processo de gerenciamento de resíduos sólidos: o diagrama ilustra as etapas essenciais, desde a geração até a disposição final, passando pela coleta e processamento. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de ferramenta de IA (Google.gemini.com).

Outro aspecto relevante refere-se à incorporação de práticas sustentáveis, como a coleta seletiva, a reciclagem e a valorização de resíduos, que fortalecem a economia circular e reduzem a pressão sobre recursos naturais. A eficiência desses serviços também está associada à gestão integrada, ao planejamento urbano e à participação social, incluindo o engajamento de cooperativas de catadores e a educação ambiental da

população. Dessa forma, os serviços de limpeza urbana ultrapassam sua função operacional, consolidando-se como instrumentos fundamentais de gestão ambiental e desenvolvimento urbano sustentável. Os principais serviços que caracterizam essa atividade são (Figura 3)

5.1. Varrição de logradouros públicos: ruas, avenidas e praças

Conforme estabelece a NBR 12980, o serviço de varrição compreende a limpeza manual ou mecânica de vias e logradouros públicos em geral. Realizada por garis ou varredeiras mecanizadas, essa é considerada a principal atividade no setor de limpeza urbana (ABNT, 1993).

Operacionalmente, a maior parte dos resíduos urbanos concentra-se nas sarjetas e junto ao meio-fio, fenômeno causado tanto pelo deslocamento de ar dos veículos quanto pela ação das chuvas. Em decorrência dessa dinâmica, as prefeituras costumam focar a atuação dos garis varredores na limpeza das sarjetas e dos ralos (IBAM, 1991), sendo que, historicamente no Brasil, a manutenção das calçadas cabe aos proprietários dos imóveis vizinhos.

5.2. Limpeza manual

Geralmente, a limpeza manual é realizada por um gari que varre, recolhe e destina os resíduos a um ponto de remoção. A quantidade de mão de obra necessária depende da extensão da sarjeta a ser varrida em relação à velocidade de varrição. Em sua função, o varredor deve recolher o lixo espalhado pelas ruas; efetuar a varrição do passeio e da sarjeta no roteiro determinado; esvaziar as caixas coletoras de papéis (papeleiras); arrancar o mato da sarjeta e ao redor das árvores e postes (com periodicidade quinzenal); e limpar os ralos do trajeto (Monteiro *et al.*, 2001).

As vestimentas dos trabalhadores comumente usadas são: calça, blusão, borzeguim, boné e luvas. Por questões de segurança, os uniformes geralmente possuem cores chamativas, como o laranja, e podem conter faixas reflexivas para evitar acidentes, principalmente no período noturno. A opção pela varrição

noturna visa evitar que automóveis estacionados atrapalhem a execução do serviço (*ibidem*).

Os equipamentos mais utilizados pelos garis varredores são: vassoura grande ("vassourão"), vassoura pequena, pá quadrada, chave de abertura de ralos, enxada para limpeza de ralos (Figura 4); carrinho de ferro com rodas de pneus (lutocar), que pode ser de estrutura metálica montada sobre rodas para suportar recipientes para sacos plásticos (Figura 5); ou carrinhos confeccionados de PVC com a mesma estrutura (Figura 6), sacos plásticos para recolher o lixo, fincos, tripé com bandeirinha para sinalização, cones, placas e demais equipamentos de segurança (Monteiro *et al.*, 2001; Barros, 2012).

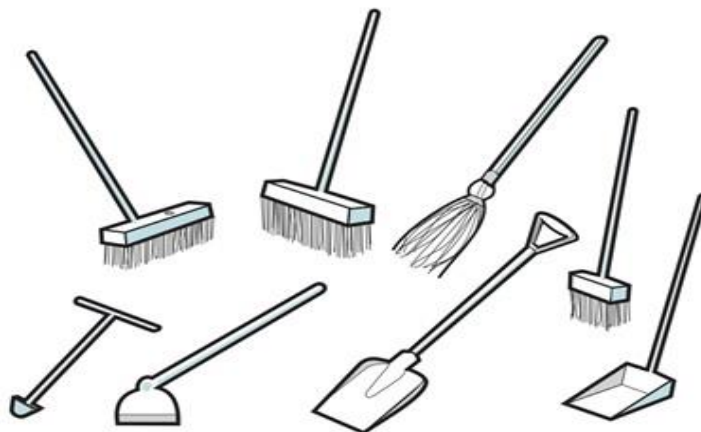


Figura 4. Vassoura moderna, vassourão, vassoura de bruxa, vassoura pequena, chave para ralo, enxada para limpeza de ralo, pá quadrada e pá especial para varrição. Fonte: Monteiro *et al.*, 2001.



Figuras 5 e 6. Carrinho com estrutura de metal e de PVC. Fonte: Zagato, 2009.

Conforme a Cartilha de Limpeza Urbana do Instituto Brasileiro de Administração Municipal (IBAM), a produtividade da varrição depende do tipo de pavimentação, da existência ou não de estacionamentos, da circulação de pedestres e veículos, da inclinação da rua, entre outros fatores. Geralmente, o rendimento de um varredor fica em torno de 2 a 4 km/dia (IBAM, 1991).

5.3. Limpeza mecanizada

A limpeza pública mecanizada é executada primordialmente por varredeiras, que se subdividem em duas categorias funcionais: as mecânicas, que utilizam escovas rotativas para conduzir os detritos ao interior do equipamento; e as aspiradoras, que realizam a sucção direta dos resíduos (CEMPRE, 2018).

De acordo com Monteiro *et al.* (2001), essa modalidade é especialmente recomendada para áreas de grande extensão ou alta periculosidade, tais como: aeroportos e vias pavimentadas extensas; túneis, pontes e viadutos; e vias de trânsito rápido, onde a exposição direta de garis ao fluxo de veículos representaria um risco severo à integridade física.

Contudo, a aplicação prática dessa tecnologia enfrenta obstáculos estruturais. A eficiência das máquinas é comprometida em cenários com veículos estacionados, declives acentuados ou presença de elementos urbanos específicos, como calhas pluviais e "despertadores" (frisos elevados) situados próximos às muretas de contenção.

No que tange ao maquinário, a literatura especializada destaca uma gama variada de equipamentos, incluindo minivarredeiras, varredeiras mecânicas sobre chassi, modelos de grande porte e dispositivos de minivácuo, além do auxílio da varrição eólica via sopradores costais (Monteiro *et al.*, 2001) (Figuras 7 e 8).

Em termos de *performance*, o contraste entre o homem e a máquina é nítido: enquanto uma varredeira mecanizada é capaz de percorrer até 30 km de sarjeta por turno, mantendo uma velocidade média de 3 a 5 km/h, o rendimento humano é naturalmente inferior em escala métrica.



Figuras 7 e 8. Varredeira mecânica e de grande porte. Fonte: Monteiro *et al.*, 2001.

No entanto, a escolha pela varrição manual no Brasil transcende a métrica da produtividade. Existe um fator humano e social preponderante: em um cenário econômico que demanda a inclusão de cidadãos com menor nível de especialização, o setor de limpeza urbana atua como um importante pilar de empregabilidade. Assim, a manutenção do trabalho manual não é apenas uma questão de técnica, mas um compromisso com a dignidade e o sustento de milhares de famílias que encontram, no zelo pelas ruas, a sua principal fonte de renda.

5.4. Limpeza de bocas de lobo

A manutenção das bocas de lobo consiste na desobstrução sistemática das estruturas de drenagem subterrâneas. O objetivo primordial dessa prática é assegurar o escoamento eficiente das águas pluviais, mitigando o risco de alagamentos e inundações em logradouros públicos. Frequentemente, esta tarefa ocorre de forma integrada ao serviço de varrição. Contudo, nota-se um desafio operacional: a prática inadequada de conduzir detritos da varrição para o interior dos ralos acaba por acelerar o entupimento das galerias, demandando uma vigilância constante por parte dos agentes de limpeza (Barros, 2012).

✓ Planejamento e operação

A periodicidade desse serviço não é uniforme, sendo determinada pela vulnerabilidade geográfica de cada setor urbano. Áreas situadas em depressões

topográficas, encostas ou regiões com urbanização precária são consideradas prioritárias. Para essas zonas críticas, o planejamento técnico recomenda que a desobstrução seja realizada com, no mínimo, dois meses de antecedência ao início do período sazonal de chuvas (*ibidem*).

No campo operacional, a execução exige o uso de ferramentas específicas para o manejo de estruturas pesadas e remoção de sedimentos compactados. Segundo Monteiro *et al.* (2001), o kit operacional padrão inclui (Figura 9):

- Alavancas, marretas e talhadeiras;
- Chave de ralo (instrumento essencial para abertura das tampas);
- Enxadas, pás, picaretas e ganchos.

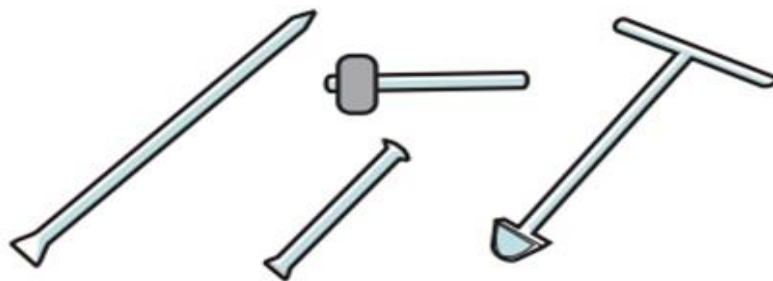


Figura 9. Alavanca, marreta, talhadeira e chave de ralo. Fonte: Monteiro *et al.*, 2001).

✓ O olhar humano sobre a drenagem urbana

Embora pareça uma tarefa estritamente técnica e invisível aos olhos da maioria da população, a limpeza das bocas de lobo é uma das funções mais vitais para a segurança e o bem-estar da comunidade. O profissional que executa essa tarefa atua como um guardião da infraestrutura urbana.

Humanizar este processo significa reconhecer que, por trás de uma galeria desobstruída, existe o esforço físico e a dedicação de trabalhadores que, muitas vezes sob condições adversas, garantem que as famílias das áreas mais vulneráveis não percam seus bens ou sua segurança durante as tempestades. É um trabalho de prevenção que, embora silencioso, salva o patrimônio e a dignidade do cidadão.

5.5. Capina e raspagem

A atividade de capina caracteriza-se pelo corte da vegetação rente ao solo, sendo uma operação essencial para a estética urbana e a preservação do patrimônio público. Esta prática subdivide-se em modalidades distintas, conforme a metodologia aplicada:

- Capina Manual: definida pela NBR 12980 como o "corte e retirada total da cobertura vegetal existente em determinados locais, com utilização de ferramenta manual" (ABNT, 1993). É um trabalho minucioso que exige esforço físico direto do operador.

- Capina Mecânica: utiliza equipamentos motorizados para agilizar o processo em áreas de maior extensão.

- Capina Química: consiste na "eliminação de vegetais realizada através da aplicação de produtos químicos que, além de matá-los, podem impedir o seu crescimento" (ABNT, 1993). Vale ressaltar que o uso dessa modalidade em áreas urbanas é rigorosamente regulamentado devido aos potenciais impactos ambientais e à saúde pública.

Paralelamente, a raspagem é uma operação técnica complementar. Segundo a NBR 12980 (ABNT, 1993), trata-se da "operação de retirada de terra e resíduos acumulados em excesso em vias e logradouros públicos, principalmente nas sarjetas, não removíveis por vassouras ou vassourões, sendo, para tanto, utilizadas ferramentas manuais" (Figura 10).

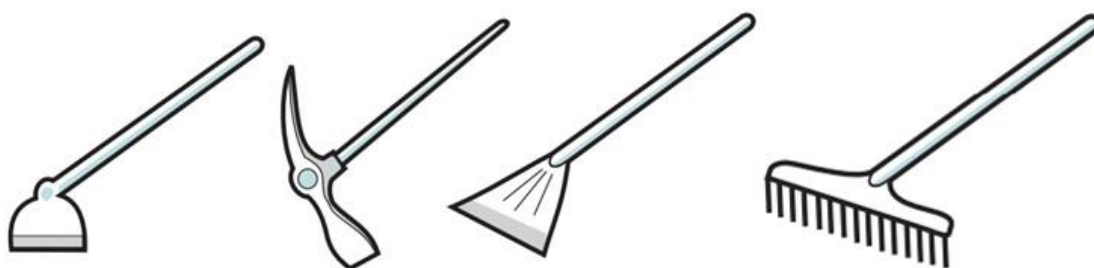


Figura 10. Enxada, chibanca, raspadeira e ancinho. Fonte: Monteiro *et al.*, 2001.

A execução conjunta da capina, raspagem e varrição de ruas, alamedas e avenidas é uma estratégia operacional que visa a otimização da limpeza urbana. Essa integração impede o acúmulo de resíduos sólidos em meio à vegetação e

aos sedimentos, assegurando que os sistemas de drenagem pluvial mantenham sua plena funcionalidade (Barros, 2012; Cândido; Cabral; Borma, 2017).

Além do ambiente estritamente viário, a manutenção da cobertura vegetal estende-se às margens de rios e canais. Nestes locais, a intervenção é fundamental para (Zagato, 2009; Cândido; Cabral; Borma, 2017):

- Prevenir a obstrução hídrica: garantindo o fluxo livre das águas e mitigando riscos de transbordamento;
- Controle de vetores: eliminando criadouros de mosquitos e abrigos para roedores;
- Preservação da saúde e estética: evitando a degradação visual e a propagação de zoonoses.

✓ A dimensão humana do zelador urbano

Embora as normas técnicas da ABNT definam os processos de forma pragmática, a capina e a raspagem são atividades que evidenciam o zelo cotidiano pela cidade. O profissional que executa a capina manual e a raspagem atua diretamente na "primeira linha" de combate à degradação urbana (Figura 11).



Figura 11. Operários em serviço de capina. Fonte: Zagato, 2009.

Humanizar este serviço é entender que a retirada de ervas daninhas e a raspagem de sedimentos das sarjetas não servem apenas para a beleza visual;

eles evitam o acúmulo de vetores de doenças e garantem que a infraestrutura urbana não seja deteriorada pela força da natureza descontrolada. É o esforço silencioso de trabalhadores que, sob o sol, moldam a face limpa e organizada dos nossos bairros, transformando espaços brutos em locais de convivência mais dignos e acolhedores.

✓ **Produtividade e sazonalidade**

A frequência dessas intervenções é variável, oscilando geralmente entre 30 e 120 dias. Essa periodicidade é ditada pelas condições climáticas, que aceleram o crescimento biológico em períodos chuvosos, e pela intensidade de uso do espaço público.

Em termos de rendimento operacional, observa-se uma disparidade técnica significativa entre os métodos (Barros, 2012; CEMPRE, 2018):

- Capina Manual: apresenta uma produtividade média de até 150 m²/dia por servidor.
- Tratamento Químico: permite que um único operador pulverize uma área de até 10.000 m²/dia.

✓ **A essencialidade por trás dos números**

Embora os dados de produtividade evidenciem a rapidez do tratamento químico, é fundamental lançar um olhar humanizado sobre o trabalho braçal da capina manual. O servidor que atua nessa frente não está apenas removendo vegetação; ele é um agente de saúde preventiva.

Ao limpar as margens de um canal ou o meio-fio de uma avenida, esse trabalhador protege a comunidade contra epidemias e inundações. Enquanto a máquina ou o produto químico priorizam a velocidade, o trabalho manual carrega consigo o cuidado minucioso com os detalhes que garantem a segurança sanitária dos bairros. Valorizar essa função é reconhecer que a limpeza urbana é, antes de tudo, um ato de cuidado com a vida e com o bem-estar coletivo.

✓ Restrições à capina química e impactos socioambientais

No que tange à capina química, sua aplicação em ambientes urbanos é amplamente desencorajada em virtude do elevado potencial de poluição e contaminação ambiental. O uso de herbicidas impacta severamente o solo e os recursos hídricos, além de representar riscos diretos à fauna, à flora local e à saúde das comunidades vizinhas. Adicionalmente, o próprio operador do serviço é exposto a níveis críticos de toxicidade ocupacional (ANVISA, 2010; Souza; Silva, 2011; Cândido; Cabral; Borma, 2017; Oliveira *et al.*, 2025).

Historicamente, essa prática era adotada de maneira restrita em áreas periféricas ou locais com baixa densidade de vegetação ornamental. Os principais atrativos para sua utilização residiam no baixo custo operacional, na alta produtividade e no efeito residual prolongado, que mantinha as áreas limpas por períodos superiores aos métodos mecânicos.

Entretanto, devido aos riscos supracitados, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) proibiu terminantemente a capina química em zonas urbanas. Atualmente, não existem produtos agrotóxicos ou herbicidas registrados no Brasil para essa finalidade específica, tornando qualquer aplicação em logradouros públicos uma infração sanitária e ambiental (ANVISA, 2010).

✓ Ética e segurança no cuidado com a cidade

A proibição da capina química é um marco fundamental para a proteção da vida. Humanizar essa discussão significa entender que a "eficiência" financeira de um produto químico nunca deve se sobrepor à segurança de quem habita a cidade ou de quem trabalha nela (Oliveira *et al.*, 2025).

Ao optar pelo controle manual ou mecânico, a gestão pública faz uma escolha ética: prioriza a preservação dos lençóis freáticos, a saúde das crianças que brincam nas calçadas e a integridade física do trabalhador da limpeza. É a transição de uma visão puramente utilitarista da limpeza para uma visão de saúde única, onde o bem-estar humano e o equilíbrio ambiental são indissociáveis (Souza; Silva, 2011; Oliveira *et al.*, 2025).

5.6. Poda e roçagem (roçada)

Com fundamentação na NBR 12980 (ABNT, 1993), a roçada define-se como o "corte de vegetação, na qual se mantém uma cobertura vegetal viva sobre o solo". Diferente da capina, que remove a planta desde a raiz, a roçagem é aplicada em locais onde a vegetação atingiu alturas elevadas, sendo técnica e esteticamente recomendado que se mantenha uma cobertura residual de 5 a 10 cm. Esta prática não apenas organiza o aspecto visual, mas desempenha um papel ecológico crucial ao prevenir a erosão do solo e possíveis deslizamentos de terra (Barros, 2012).

Já a poda é uma intervenção seletiva que consiste na remoção de ramos mortos, doentes ou que apresentem riscos estruturais à segurança pública. Além do caráter preventivo, a poda é um instrumento do urbanismo utilizado para guiar o crescimento das plantas, harmonizando a arborização com a iluminação pública, a fiação elétrica e o paisagismo arquitetônico (Souza *et al.*, 2016).

No campo operacional, quando as atividades são executadas de forma manual, empregam-se ferramentas tradicionais e específicas, tais como: foices do tipo roçadeira ou gavião; e alfanjes (Figura 12).



Figura 12. Foice roçadeira, foice gavião e alfanje. Fonte: Monteiro *et al.*, 2001.

✓ A arte de equilibrar a natureza e a cidade

A poda e a roçagem são práticas de manejo essenciais para a manutenção de áreas urbanas e periurbanas, com funções diretas na segurança, na saúde da vegetação e na organização do espaço público. Essas atividades visam controlar o crescimento de árvores e plantas, evitando interferências com redes elétricas, vias de circulação, edificações e garantindo a visibilidade e a acessibilidade.

Do ponto de vista técnico, a poda deve ser realizada de forma adequada para não comprometer a estrutura e a sanidade das árvores, prevenindo quedas de galhos e a incidência de pragas e doenças. Já a roçagem contribui para o controle da vegetação rasteira, reduzindo riscos associados à presença de animais peçonhentos, melhorando a drenagem e diminuindo a ocorrência de incêndios em períodos secos.

Trata-se, portanto, de um conjunto de operações que exige conhecimento técnico, planejamento e execução adequada, sendo fundamental para a conservação dos espaços urbanos, o bem-estar da população e a sustentabilidade ambiental.

No âmbito do trabalho mecanizado, a eficiência operacional é potencializada pelo emprego de maquinário especializado, selecionado de acordo com a extensão da área e a densidade da vegetação. Segundo Monteiro *et al.* (2001), os principais equipamentos utilizados incluem (Figura 13):

- Unidades portáteis: roçadeiras costais e motosserras, ideais para cortes precisos e manejo de galhos.
- Equipamentos de médio e grande porte: braço roçador (acoplado a tratores), microtratores aparadores de grama e roçadeiras rebocadas, voltados para grandes extensões de áreas verdes e margens de rodovias.
- Gestão de resíduos: trituradores de galhos (estacionários ou rebocados), que facilitam o transporte e a futura compostagem ao reduzir o volume do material coletado.



Figura 13. Roçadeira costal, motosserra e microtrator aparador de grama. Fonte: Monteiro *et al.*, 2001.

Após a etapa de supressão vegetal, a eficiência da limpeza pública depende do recolhimento meticuloso dos resíduos gerados. Este processo exige o uso de ferramentas manuais específicas que garantam a desobstrução total do logradouro. Para o amontoamento da biomassa, empregam-se vassouras de aço ou ancinhos; já para o agrupamento final e o carregamento, utilizam-se vassouras de mato e forcados, cujas configurações variam de quatro a dez dentes, conforme a densidade do material (Monteiro *et al.*, 2001).

No que tange à produtividade, os indicadores variam drasticamente conforme o nível de mecanização adotado, refletindo a capacidade de cobertura por jornada de trabalho (Cândido; Cabral; Borma, 2017):

Tabela 2. Modalidade de serviço e rendimentos

Modalidade de Serviço	Rendimento Estimado (por dia)
Serviço Braçal (Manual)	200 a 300 m ² por pessoa
Ceifadeiras Portáteis	800 m ² por máquina
Ceifadeiras Acopladas a Tratores	2.0 3.000 m ² por máquina

Fonte: Dados da pesquisa, 2022.

✓ A relação entre máquina e operador

O uso de máquinas amplia a eficiência das atividades de poda e roçagem, permitindo maior cobertura e redução do tempo de execução. Equipamentos como motosserras e roçadeiras são fundamentais para lidar com diferentes tipos de vegetação e condições de campo, especialmente em áreas extensas ou de difícil acesso.

No entanto, a atuação do operador continua sendo determinante para a qualidade e a segurança do serviço. Cabe a esse profissional avaliar o ambiente, identificar riscos, como proximidade de redes elétricas, presença de obstáculos

ou instabilidade da vegetação, e definir a melhor forma de execução. A máquina, por si só, não substitui essa capacidade de análise.

Assim, o resultado do trabalho depende da combinação entre o uso adequado dos equipamentos e a experiência técnica do operador, que realiza ajustes, correções e o acabamento necessário para garantir um serviço eficiente, seguro e compatível com as exigências do espaço urbano.

5.7. Limpeza de praias

A limpeza de praias consiste na remoção sistemática de resíduos sólidos, oriundos tanto do descarte inadequado por usuários quanto do transporte pela dinâmica das marés. Recomenda-se que essa atividade seja realizada, preferencialmente, em períodos de menor fluxo de pessoas, como à noite ou nas primeiras horas da manhã, a fim de reduzir interferências operacionais e aumentar a segurança (IBAM, 1991).

A execução pode ocorrer por dois métodos principais (Monteiro *et al.*, 2001):

- Limpeza mecanizada: utiliza equipamentos como microtratores com implementos de peneiramento, permitindo maior rapidez na cobertura de áreas extensas. Entretanto, apresenta limitações na retenção de resíduos de pequenas dimensões, que podem não ser totalmente removidos.
- Limpeza manual: é mais eficiente na remoção de resíduos menores e mais dispersos, sendo indicada especialmente em áreas sensíveis do ponto de vista ambiental. Empregam ferramentas como ancinhos, cestos de tela e forcados, possibilitando maior precisão na coleta.

Além da limpeza física, é fundamental a adoção de medidas complementares, como a instalação de infraestrutura adequada para o descarte de resíduos, lixeiras, contêineres e suportes para sacos plásticos, distribuídos ao longo da orla. Paralelamente, ações de educação ambiental são necessárias para reduzir a geração de resíduos e incentivar o uso correto desses dispositivos (Monteiro *et al.*, 2001).

A eficiência do sistema depende, portanto, da integração entre métodos de limpeza, planejamento operacional e conscientização dos usuários, contribuindo para a preservação ambiental, a saúde pública e a qualidade dos espaços costeiros (Figura 14)



Figura 14. Ancinho, cesto de tela, forcado de 10 dentes, manilhas com sacos plásticos e contêineres. Fonte: Monteiro *et al.*, 2001.

5.8. Limpeza, lavagem e desinfecção de feiras

A manutenção de áreas utilizadas para feiras livres exige procedimentos rigorosos de higiene, em função da grande quantidade de resíduos orgânicos gerados. De acordo com a NBR 12980, a lavagem de feiras consiste na limpeza complementar com uso de água, geralmente por meio de caminhão-pipa, após o término das atividades. Em locais com comercialização de produtos de origem animal, é necessária também a desinfecção e a desodorização, visando garantir condições sanitárias adequadas (ABNT, 1993).

A desinfecção corresponde à aplicação de agentes capazes de eliminar microrganismos patogênicos, contribuindo para a segurança sanitária do espaço público e permitindo sua reutilização em curto prazo.

A execução do serviço deve ocorrer imediatamente após o encerramento da feira. A eficiência do processo depende tanto da atuação da equipe de limpeza quanto da colaboração dos feirantes na organização das bancas e no descarte adequado dos resíduos. O fluxo operacional básico inclui:

- Varrição: remoção de resíduos sólidos e orgânicos;
- Lavagem: aplicação de água para retirada de sujidades aderidas;

- Desinfecção: uso de soluções saneantes para controle de odores e microrganismos.

A realização adequada dessas etapas é essencial para a manutenção da higiene, da saúde pública e da organização do espaço urbano.

5.9. Pintura de guias (meio-fio)

A pintura de guias, ou meio-fio, é uma atividade de sinalização horizontal e manutenção urbana que contribui para a organização dos logradouros e a segurança viária. Ao delimitar a separação entre a via e o passeio, facilita a orientação de motoristas e pedestres, especialmente em condições de baixa visibilidade. Para garantir melhor aderência e durabilidade, o serviço deve ser precedido por capina, varrição, remoção de entulhos e desobstrução de bueiros (Cândido; Cabral; Borma, 2017).

A renovação da pintura é recomendada de duas a três vezes ao ano, podendo variar conforme o fluxo de veículos, as condições climáticas e o nível de desgaste (*ibidem*):

- Pintura manual: realizada com cal ou tinta à base de látex, aplicada com brochas. Apresenta produtividade média entre 300 e 400 metros lineares por pintor/dia.
- Pintura mecanizada: indicada para vias de maior extensão, utiliza equipamentos específicos, podendo atingir cerca de 6.000 metros lineares por equipe/dia.

A execução adequada desse serviço contribui para a padronização visual, melhoria das condições de circulação e conservação dos espaços urbanos.

6. Sistema nacional de informações sobre saneamento (SNIS)

Instituído pela Lei Federal nº 11.445/2007 e reafirmado pela Lei nº 12.305/2010 (Política Nacional de Resíduos Sólidos), o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) constitui uma base de dados do governo federal, administrada pela Secretaria Nacional de Saneamento. O sistema reúne

informações e indicadores sobre os principais componentes do saneamento básico: abastecimento de água, esgotamento sanitário, manejo de resíduos sólidos e manejo de águas pluviais (SNIS, 2019; 2022).

Criado em 1994, o SNIS passou por expansão progressiva até alcançar abrangência nacional, incorporando maior número de prestadores e variáveis de análise. Atualmente, o sistema disponibiliza um conjunto estruturado de indicadores, incluindo:

- 84 indicadores relacionados aos serviços de água e esgoto;
- 47 indicadores voltados ao manejo de resíduos sólidos urbanos (RSU);
- 25 indicadores referentes ao manejo de águas pluviais.

Esses dados permitem o acompanhamento sistemático do desempenho dos serviços de saneamento no país. O SNIS tem como principais finalidades: subsidiar o planejamento e a execução de políticas públicas; orientar a aplicação de recursos no setor; possibilitar o diagnóstico e a avaliação dos serviços; monitorar o desempenho operacional; apoiar a regulação e a gestão dos serviços; e contribuir para o controle social.

Além disso, os indicadores do sistema são utilizados como referência para comparações entre municípios e avaliação de desempenho ao longo do tempo. Os dados do SNIS são disponibilizados publicamente, permitindo o acesso a séries históricas sobre a evolução do saneamento no Brasil. No caso dos resíduos sólidos urbanos, as informações são fornecidas pelos municípios, sendo necessária a consolidação local dos dados em situações com múltiplos prestadores de serviço (SNIS, 2022).

A utilização adequada dessas informações contribui para maior transparência na gestão pública, apoio à tomada de decisão e aprimoramento dos serviços de saneamento.

7. Terceirização e transparência nos serviços públicos

O ordenamento jurídico brasileiro, com base na Constituição Federal de 1988 (Art. 30, inciso V), atribui aos municípios a responsabilidade pela organização e prestação dos serviços públicos de interesse local. Essa

prestação pode ocorrer de forma direta ou indireta, por meio de concessão, permissão ou contratação de empresas privadas, observando-se as normas estabelecidas pela Lei nº 14.133/2021, que rege licitações e contratos administrativos (BRASIL, 1988; 2021).

Paralelamente, a Lei Complementar nº 131/2009 (Lei da Transparência) e o Decreto nº 7.185/2010 determinam a obrigatoriedade de divulgação, em tempo real, das informações orçamentárias e financeiras dos entes públicos. Essa exigência permite o acompanhamento dos gastos, inclusive aqueles relacionados à contratação de serviços terceirizados.

✓ **Viabilidade econômica no setor de resíduos**

A terceirização dos serviços de manejo de resíduos sólidos urbanos (RSU) é frequentemente adotada com o objetivo de aumentar a eficiência operacional e otimizar custos. A complexidade dessas atividades, que envolvem logística, equipamentos e mão de obra especializada, torna a contratação de empresas privadas uma alternativa viável para muitos municípios.

Estudos indicam que, em determinadas situações, a terceirização pode apresentar vantagens econômicas em relação à execução direta, permitindo à administração pública concentrar esforços em atividades de planejamento, regulação e fiscalização (Silva *et al.*, 2007).

✓ **Gestão, transparência e controle social**

A adoção da terceirização não exime o poder público de sua responsabilidade sobre a qualidade dos serviços prestados. Cabe ao gestor municipal assegurar o cumprimento dos contratos, a eficiência da execução e o atendimento às necessidades da população. Nesse contexto, a transparência das informações públicas desempenha papel fundamental, ao possibilitar o acompanhamento dos gastos e a avaliação dos serviços pela sociedade. O acesso a esses dados fortalece o controle social e contribui para a melhoria contínua da gestão pública, promovendo maior eficiência, responsabilidade e qualidade na prestação dos serviços.

8. Metodologia

O estudo dos indicadores econômicos foi realizado por meio da análise das séries históricas do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), especificamente no eixo de Resíduos Sólidos, abrangendo o período de 2016 a 2020 para os municípios do estado do Espírito Santo. Analisou-se o desempenho financeiro municipal no Serviço de Limpeza Urbana e Manejo de Resíduos Sólidos (SLUMRS) através da espacialização de dados em mapas elaborados no *software* QGIS (versão 3.16.10), representações gráficas no Microsoft Excel (versão 2111) e o cálculo das médias anuais de cada indicador.

Para a coleta de dados, o procedimento metodológico consistiu no acesso ao portal oficial do SNIS para a obtenção e análise das séries históricas de Resíduos Sólidos, seguido pelo agrupamento dinâmico de informações, seleção do recorte temporal, definição regional e escolha dos indicadores pertinentes. Foram selecionados os seguintes parâmetros: despesa per capita com manejo de RSU em relação à população urbana; incidência do custo do serviço de varrição no custo total com manejo de RSU; custo unitário médio do serviço de varrição (somatório de prefeitura e empresas contratadas); despesa dos agentes públicos com o serviço de varrição; e a despesa com empresas terceirizadas contratadas especificamente para a varrição.

A pesquisa acerca dos contratos de limpeza urbana foi conduzida por meio do acesso remoto aos Portais da Transparência dos municípios do estado do Espírito Santo. Para a consulta documental, aplicaram-se as palavras-chave: "resíduos sólidos", "limpeza", "limpeza urbana", "varrição", "poda", "capina", "roçada", "roçagem" e "bueiros". Cabe ressaltar que, embora o levantamento tenha buscado reunir o maior volume possível de dados, a fragmentação administrativa pode ter impossibilitado a localização de instrumentos contratuais cujos serviços de limpeza estivessem integrados a objetos de natureza distinta.

Nesse contexto, foram incluídos na amostragem apenas os contratos que apresentavam o detalhamento pormenorizado dos serviços, seja em planilhas orçamentárias anexas ou em descrições textuais ao longo do corpo do documento. Tal critério foi necessário visto que diversos contratos se limitavam a informar o objeto genérico e o valor global, sem a especificação técnica indispensável para esta análise.

Os dados coletados foram organizados em planilhas eletrônicas para a avaliação de variáveis como tipologia dos serviços, incidência de terceirização e indicadores financeiros, sendo posteriormente consolidados em tabelas para a apresentação dos resultados. A análise financeira fundamentou-se no valor unitário, escolha metodológica que viabiliza a comparação direta entre diferentes períodos de contratação (mensal, trimestral, semestral ou anual) e anula distorções causadas pela disparidade populacional, concentrando o foco estritamente nas unidades de medida determinadas em contrato.

9. Resultados e discussão

A análise dos indicadores econômicos vinculados ao Serviço de Limpeza Urbana e Manejo de Resíduos Sólidos (SLUMRS) nos municípios do Espírito Santo revela o panorama da gestão financeira do setor entre os anos de 2016 e 2020. Fundamentada nos dados do SNIS e em consultas aos Portais da Transparência, a discussão a seguir foca na eficiência técnica e econômica, priorizando a compreensão dos custos de varrição e o impacto das contratações no orçamento municipal.

O desempenho financeiro foi examinado a partir de cinco eixos centrais: a despesa *per capita* com manejo de RSU, a representatividade da varrição no custo total, o custo unitário médio do serviço e a distribuição de despesas entre a administração direta e empresas terceirizadas. A espacialização desses dados, consolidada por meio de ferramentas de geoprocessamento (QGIS) e análise estatística (Excel), permitiu identificar disparidades regionais e tendências de custo no território capixaba.

A escolha do valor unitário como métrica principal de análise justifica-se pela sua capacidade de isolar variáveis que poderiam distorcer os resultados, como a densidade populacional e os diferentes períodos de vigência contratual. Dessa forma, a discussão concentra-se na eficiência intrínseca da prestação do serviço por unidade de medida, garantindo uma comparação equânime entre municípios de diferentes portes.

A investigação documental nos portais da transparência evidenciou o estágio atual da gestão da informação pública. Embora a pesquisa tenha

utilizado termos abrangentes, como "varrição", "poda" e "capina", a fragmentação dos objetos contratuais e o agrupamento de serviços distintos em um único instrumento jurídico representaram desafios à sistematização integral dos dados.

A análise revela que o detalhamento técnico em planilhas orçamentárias é um diferencial indispensável para a fiscalização efetiva. Municípios que disponibilizam descrições pormenorizadas permitem não apenas uma melhor avaliação da viabilidade econômica, conforme discutido por Silva *et al.* (2007), mas também o exercício pleno do controle social. Os resultados demonstram que a transparência financeira não é apenas um dever acessório, mas uma ferramenta de gestão que impacta diretamente a qualidade do serviço de limpeza urbana entregue ao cidadão.

A terceirização dos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos consolidaram-se como prática predominante entre os municípios do Espírito Santo. Amparada pela Constituição Federal (Art. 30, inciso V) e regulamentada pela Lei nº 14.133/2021, essa estratégia tem como objetivo a redução de custos operacionais e o aproveitamento da especialização técnica do setor privado. No entanto, os dados evidenciam um cenário ambivalente: embora a terceirização possa reduzir a carga administrativa direta dos municípios, também pode resultar em elevação de custos quando a gestão contratual é inadequada ou pouco eficiente.

Nesse contexto, a transparência assume papel central na gestão pública. Apesar das exigências da Lei Complementar nº 131/2009 quanto à divulgação de informações em tempo real, observam-se lacunas relevantes na disponibilização de dados. A ausência de detalhamento em instrumentos contratuais compromete tanto o monitoramento técnico quanto o controle social, dificultando a avaliação da eficiência na aplicação dos recursos públicos.

A análise comparativa indica que a viabilidade econômica da terceirização está diretamente relacionada à estruturação dos contratos e à escala de operação dos municípios. Em localidades com maior densidade populacional, como Vitória e Vila Velha, os custos unitários tendem a ser menores, em função da diluição dos custos fixos.

Por outro lado, municípios de menor porte, como Alegre, ES, apresentam custos *per capita* mais elevados, reflexo da menor escala operacional e da maior dependência de serviços terceirizados. Entre os componentes do sistema, a varrição destaca-se como uma das atividades mais onerosas, representando parcela significativa dos gastos municipais. Observa-se ainda que municípios com maior grau de terceirização, como Serra e Linhares, ES, podem apresentar custos unitários mais elevados, o que reforça a necessidade de gestão contratual eficiente.

Dessa forma, a terceirização não deve ser compreendida apenas como transferência de execução de serviços, mas como um modelo que exige planejamento, regulação e fiscalização contínua por parte do poder público. O fortalecimento da transparência e dos mecanismos de controle é fundamental para garantir a eficiência do gasto público, a qualidade dos serviços prestados e a adequada utilização dos recursos, contribuindo para a melhoria das condições urbanas e da saúde pública.

9.1. Indicadores de limpeza urbana

No que concerne à análise dos indicadores extraídos das séries históricas do SNIS, observa-se que, entre todos os serviços que compõem a limpeza urbana, apenas a varrição dispõe de informações financeiras detalhadas e indicadores de custos estruturados. Os resultados a seguir, apresentados mediante representações visuais e discussões técnicas, fundamentam-se nesses dados específicos. É importante destacar que a ausência de registros para determinados municípios decorre da natureza não obrigatória do fornecimento de dados ao sistema. Contudo, essa lacuna pode impactar a gestão local, uma vez que programas de investimento do Ministério do Desenvolvimento Regional frequentemente adotam o envio regular de informações como critério seletivo para o repasse de recursos.

Para a confecção dos mapas ilustrativos, adotaram-se os dados consolidados do ano de 2020, enquanto a elaboração dos gráficos baseou-se no intervalo temporal de 2016 a 2020. Com o intuito de conferir maior rigor estatístico e clareza visual, foram inseridas linhas de tendência linear para cada

ano da série histórica, apresentadas de forma crescente com interseção na origem \$(0,0)\$, conforme as diretrizes técnicas vigentes (BRASIL, 2022). Complementarmente, a Tabela 3 sintetiza as médias anuais de cada indicador estudado, servindo como base norteadora para as discussões dos resultados apresentadas adiante.

Tabela 3. Médias anuais dos indicadores

Ano	Média IN046 (%)	Média IN043 (R/Km)	Média FN212 (R\$/ano)	Média FN213 (R\$/ano)
2016	35,12	96,66	526.773,93	1.371.134,74
2017	45,43	98,25	1.031.299,24	1.031.299,24
2018	43,73	105,21	809.859,75	1.513.509,18
2019	41,18	106,77	932.143,89	1.550.946,21
2020	41,68	98,29	841.358,96	1.400.312,22

Fonte: Elaborado pelo primeiro autor.

✓ **IN006** - Despesa *per capita* com manejo de RSU em relação à população urbana

Este indicador refere-se ao valor gasto com as despesas com manejo de resíduos sólidos urbanos (RSU) em relação à população urbana (R\$/hab.). É calculado a partir da divisão da despesa total com serviços de manejo de RSU pela população urbana do município (Equação 1). A Figura 15 é representativa desse indicador para o ano de 2020.

$$\frac{\text{FN 220}}{\text{POP URB}}$$

Equação 1

Onde,

FN220: Despesa total com manejo de RSU;

POP_URB: População urbana do município.

Por intermédio da Figura 15, observa-se que o custo por habitante para a realização dos serviços gerais de manejo de RSU é expressivo, apresentando uma média de 162,69 R\$/hab. e atingindo o patamar de 477,52 R\$/hab. no município de Vila Pavão, conforme os dados processados para a elaboração do mapa. Paralelamente, a Figura 15 evidencia uma acentuada discrepância entre os municípios; a variação das faixas de identificação revela, por exemplo, que Conceição do Castelo registrou uma despesa de apenas 16,26 R\$/hab.

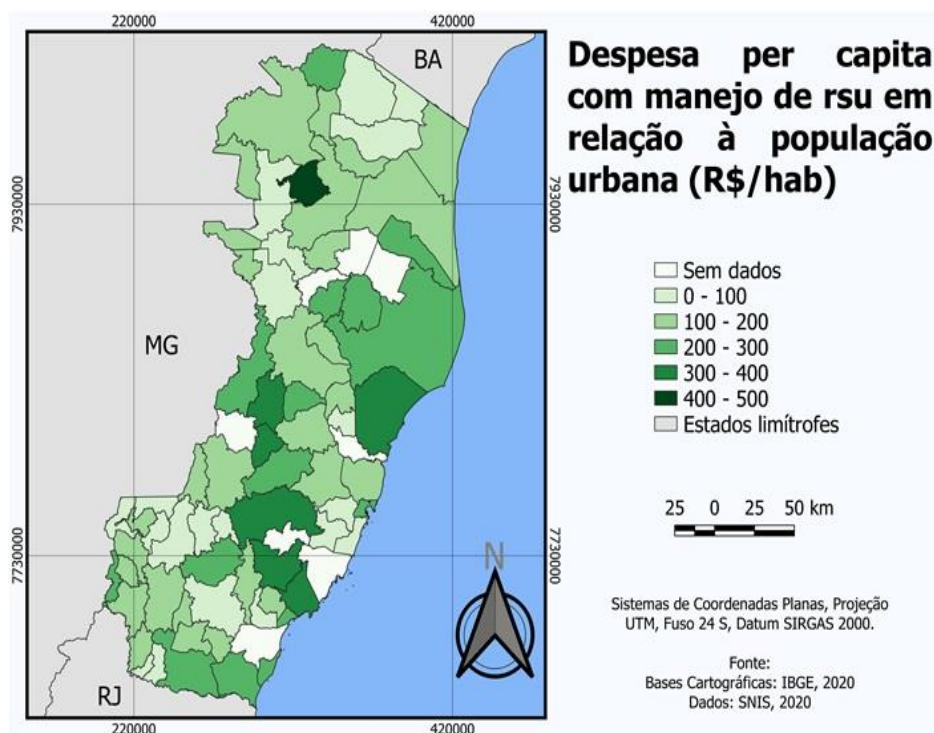


Figura 15. Mapa do indicador IN006 para os municípios do ES. Fonte: Elaborado pelo primeiro autor. Nota: Dados obtidos a partir das Séries Históricas SNIS – RS (dados de 2020).

O manejo de RSU, de modo geral, consome uma parcela significativa dos recursos orçamentários municipais. No ano de 2020, o indicador IN003 (Incidência das despesas com o manejo de RSU nas despesas correntes da prefeitura) registrou uma média de 4%, dado que reforça a discussão sobre a necessidade de implantação de mecanismos de cobrança por esses serviços para garantir a sustentabilidade do sistema.

✓ **IN046** - Incidência do custo do serviço de varrição no custo total com manejo de RSU

Este indicador apresenta o percentual (%) do custo com serviço de serviço de varrição em relação ao custo total do manejo de RSU e é calculado a partir da divisão do somatório das despesas dos agentes públicos e privados para execução dos serviços de varrição pelo somatório das despesas para execução de todos os serviços de manejo de RSU (equação 2). A Figura 16 e o Gráfico 1 são ilustrações desse indicador (SNIS, 2021b).

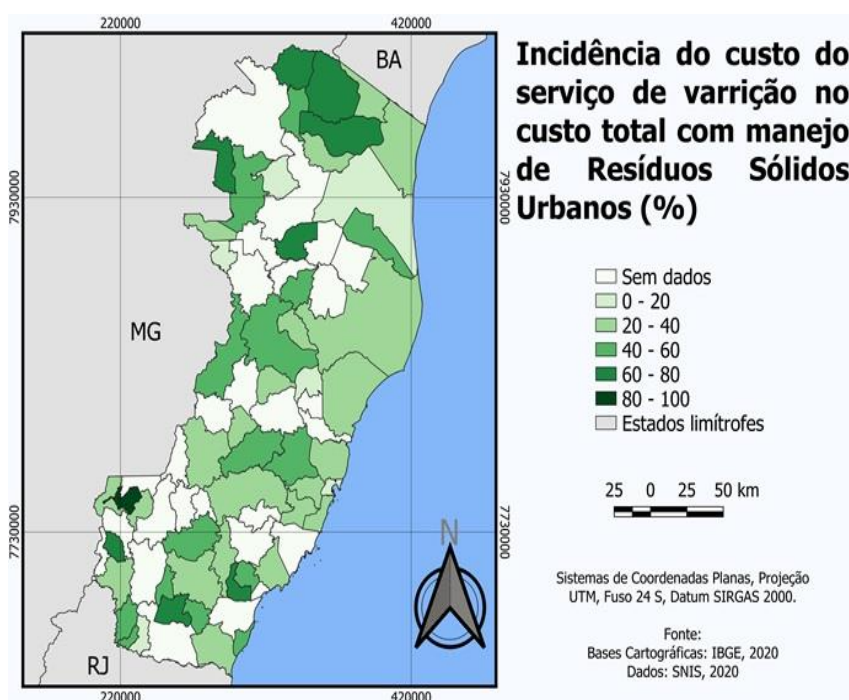


Figura 16. Mapa do indicador IN046 para os municípios do ES. Fonte: Elaborado pelo autor. Nota: Dados obtidos a partir das Séries Históricas SNIS – RS, dados 2020.

$$\frac{FN212 + FN213}{FN218 + FN219}$$

Equação 2

Onde:

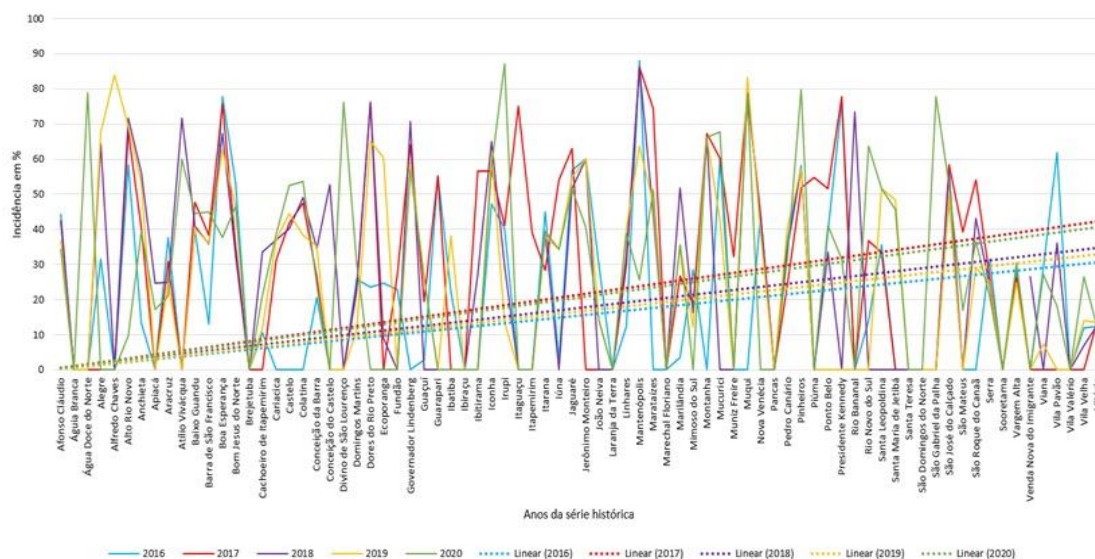
FN 212: Despesa dos agentes públicos com o serviço de varrição;

FN 213: Despesa com empresas contratadas para o serviço de varrição;

FN218: Despesa dos agentes públicos executores de serviços de manejo de RSU;

FN219: Despesa com agentes privados executores de serviços de manejo de RSU.

Gráfico 1. IN046 - Incidência do custo do serviço de varrição no custo total com manejo de RSU



Fonte: Elaborado pelo autor. Nota: Dados obtidos a partir das Séries Históricas SNIS – RS, dados de 2016 a 2020.

A incidência média do custo do serviço de varrição no custo total do manejo dos RSU, ao longo das séries históricas, situou-se entre 35% e 45%. Como pode ser observado no Gráfico 1, esse valor atingiu quase 90% no município de Mantenedorópolis nos anos de 2016, 2017 e 2018, e em Irupe no ano de 2020, conforme também apresentado na Figura 16. Observa-se ainda, tanto na Figura 16 quanto no Gráfico 1, uma grande variação entre os valores; no entanto, de modo geral, estes permaneceram acima de 30%.

Esses resultados indicam que o serviço de varrição apresenta participação significativa no custo total do manejo dos RSU e, em especial, na limpeza urbana, sendo um dos componentes de maior representatividade nos gastos municipais.

✓ **IN043** - Custo unitário médio do serviço de varrição (prefeitura + empresas contratadas)

Esse indicador refere-se ao somatório de todos os gastos com serviço de varrição, tanto do setor público, como de empresas contratadas, em relação à extensão de sarjeta varrida (R\$/Km). É calculado por meio da equação 3. A

Figura 17 é uma representação do ano de 2020 desse indicador e o Gráfico 1, uma ilustração da série histórica estudada (2016 – 2020) (SNIS, 2021b).

$$\frac{FN212 + FN213}{VA039}$$

Equação 3

Onde:

FN 212: Despesa dos agentes públicos com o serviço de varrição;

FN 213: Despesa com empresas contratadas para o serviço de varrição;

VA039: Extensão total de sarjetas varridas pelos executores (Km varridos).

Por intermédio desse indicador, como observado na Figura 17 e no Gráfico 2, verifica-se uma grande quantidade de municípios que não disponibilizaram dados para a realização do cálculo do IN043. Como pode ser constatado na Tabela 4 da análise dos contratos, nota-se que os municípios não seguem a mesma unidade para a contratação desse serviço, sendo uma possível justificativa para a baixa quantidade de dados. O ideal é que o custo com a varrição de logradouros seja calculado em R\$/Km varrido, conforme a unidade do indicador IN043, entretanto, muitos municípios não adotam essa unidade para a contratação desse serviço.

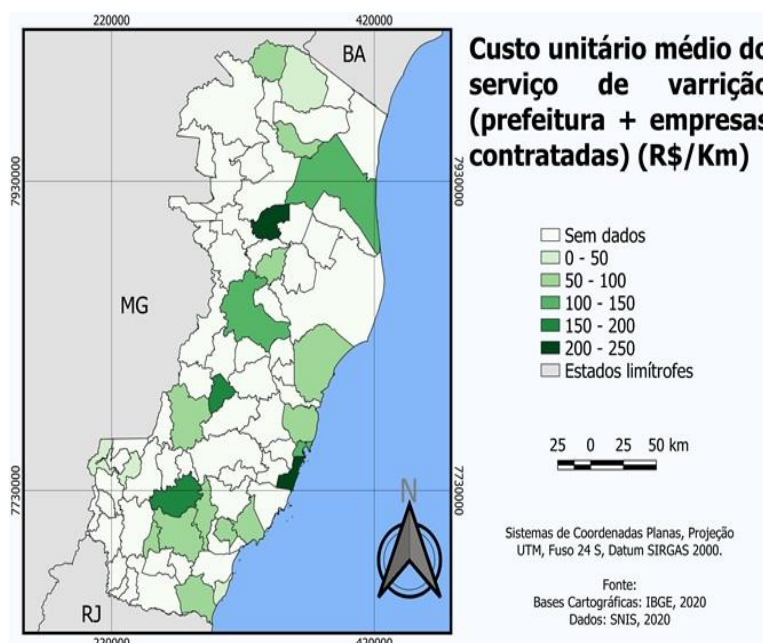
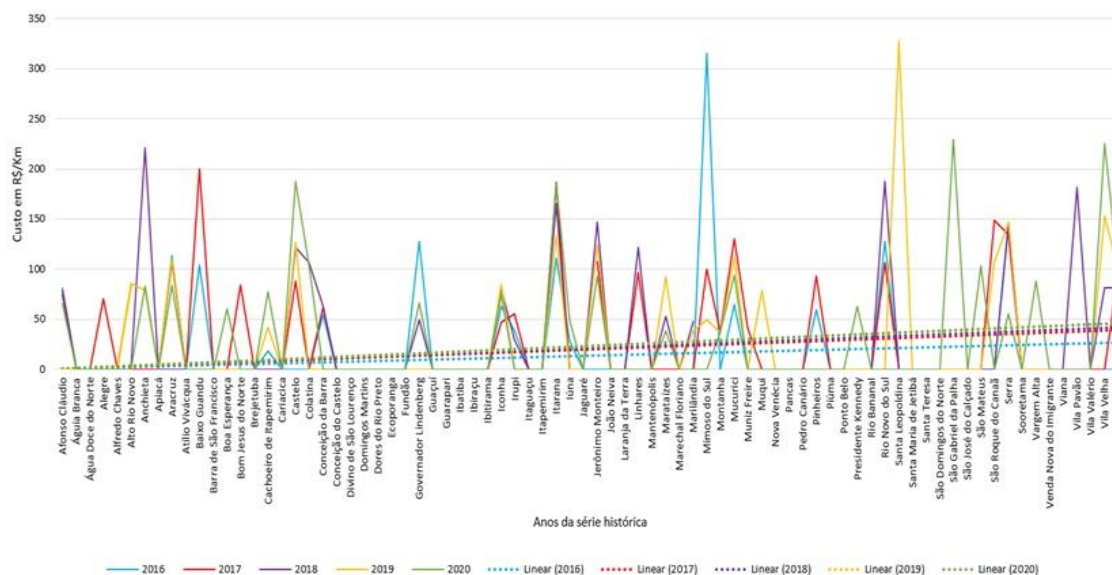


Figura 17. Mapa do indicador IN043 para os municípios do ES. Fonte: Elaborado pelo primeiro autor. Nota: Dados obtidos a partir das Séries Históricas SNIS – RS, dados de 2020.

Gráfico 2. IN043 - Custo unitário médio do serviço de varrição (prefeitura + empresas contratadas)



Fonte: Elaborado pelo autor. Nota: Dados obtidos a partir das Séries Históricas SNIS – RS, dados de 2016 a 2020.

As médias anuais para esse indicador situaram-se na faixa de 98 a 106 R\$/km, ultrapassando 200 R\$/km nos municípios de São Gabriel da Palha e Vila Velha no último ano de dados disponíveis, conforme a Figura 17. Pelo Gráfico 2, observa-se que os valores ultrapassaram 300 R\$/km em Mimoso do Sul e Santa Leopoldina, nos anos de 2016 e 2019, respectivamente. No entanto, a maioria dos dados concentrou-se em torno de 100 R\$/km, sendo que apenas em Cachoeiro de Itapemirim o valor ficou abaixo de 25 R\$/km no ano de 2016.

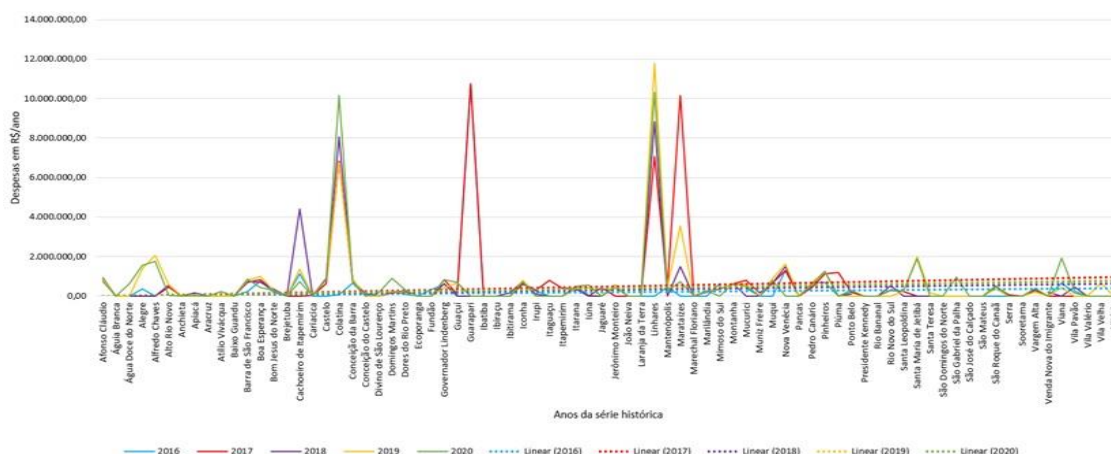
✓ **FN212** - Despesas dos agentes públicos com o serviço de varrição

Retrata o valor anual (R\$/ano) das despesas das prefeituras com o serviço de varrição de vias e logradouros públicos. O Gráfico 3 é referente a série histórica (2016 – 2020) para o indicador FN212 (SNIS, 2021a).

✓ **FN213** - Despesa com empresas contratadas para o serviço de varrição

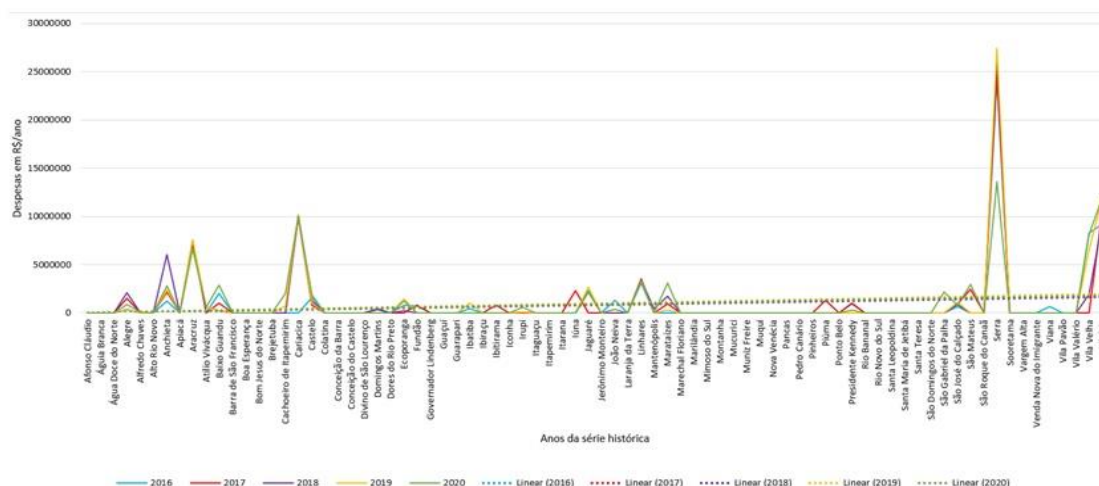
Indica o valor anual (R\$/ano) das despesas da Prefeitura com empresas contratadas exclusivamente para execução do serviço de varrição de vias e logradouros públicos. O Gráfico 4 retrata os dados da série histórica para esse indicador (SNIS, 2021a).

Gráfico 3. FN212 - Despesa dos agentes públicos com o serviço de varrição



Fonte: Elaborado pelo primeiro autor. Nota: Dados obtidos a partir das Séries Históricas SNIS – RS, dados de 2016 a 2020.

Gráfico 4. FN213 - Despesa com empresas contratadas para o serviço de varrição



Fonte: Elaborado pelo primeiro autor. Nota: Dados obtidos a partir das Séries Históricas SNIS – RS, dados de 2016 a 2020.

Com base nas informações financeiras, as médias dos indicadores FN212 situaram-se entre 500 mil e 1 milhão, enquanto o FN213 manteve valores acima de 1 milhão em todos os anos, atingindo 1.550.946,2 em 2019. A princípio, isso indica que os serviços de varrição são, em geral, executados por empresas contratadas. Entretanto, observa-se que há maior quantidade de dados disponíveis para o indicador FN212, o que sugere que, em municípios menos populosos, a execução ainda ocorre predominantemente por agentes públicos.

O município de Serra apresenta valores significativamente elevados para o indicador FN213 e ausência de dados em quatro dos cinco anos da série (2016–2020) para o FN212, indicando que o serviço de varrição é majoritariamente terceirizado. Nesse município, o custo ultrapassou 27 milhões no ano de 2019. Esses valores elevados influenciam a média do indicador FN213, podendo gerar a percepção de maior predominância da execução por empresas privadas.

Esse padrão é reforçado pelos dados apresentados no Gráfico 4, nos quais se observa que os quatro municípios mais populosos do estado, Serra, Vila Velha, Cariacica e Vitória, adotam predominantemente a terceirização dos serviços de limpeza urbana, contribuindo para o aumento das despesas associadas ao setor privado (IBGE, 2021).

9.2. Tratamento dos contratos de limpeza urbana

No que se refere aos contratos de limpeza urbana, foram identificados 29 contratos distribuídos em 27 municípios. Desses, 24 apresentam detalhamento dos serviços prestados. Em relação ao período de contratação, foram encontrados registros entre os anos de 2014 e 2021, com ausência de contratos no ano de 2015. Observa-se ainda que alguns contratos foram renovados para períodos subsequentes. A quantidade relativamente reduzida de contratos pode ser explicada pelo fato de diversos municípios executarem os serviços de limpeza urbana de forma direta. Outro fator relevante é a limitada disponibilização de informações nos portais de transparência municipais.

Auditoria realizada pelo Tribunal de Contas do Estado do Espírito Santo (TCE-ES) apontou melhora na transparência dos portais das prefeituras a partir de 2017; contudo, ainda persistem deficiências na divulgação de dados. Para o

conjunto de informações relacionadas a contratos e licitações, a média de atendimento foi de 79% (TCE-ES, 2022).

Em avaliação mais recente, conduzida pela Controladoria-Geral da União por meio da Escala Brasil Transparente (EBT), o estado do Espírito Santo alcançou nota máxima, sendo classificado entre os mais transparentes do país (BRASIL, 2021a).

A Tabela 4 apresenta informações referentes à especificação dos serviços contratados, bem como à frequência de sua execução pelas prefeituras, com base no número de contratações realizadas.

Tabela 4. Quantidade de municípios que os Serviços específicos de Limpeza Urbana foram contratados de forma separada ou em conjunto com outros serviços

Serviços de LU	Quantidade de municípios
Varrição manual	18
Varrição mecanizada	8
Capina manual	8
Capina mecanizada	3
Poda	4
Limpeza manual de praia	3
Limpeza mecanizada de praia	2
Pintura de meio fio e outros, manual e mecanizada	10
Limpeza de praças, pontes, parques de exposição e outros equipamentos públicos correlatos	3
Roçada manual e mecanizada	4
Manutenção de cemitério	2
Limpeza de bueiros, bocas de lobo, etc.	4
Lavagem e desinfecção de vias, pátios de feiras livres e mercados	4

Fonte: Elaborado pelo primeiro autor.

Na Tabela 5, observa-se a forma como os municípios especificam os serviços de limpeza urbana, bem como a identificação dos principais serviços executados no estado do Espírito Santo. Verifica-se que a varrição manual é o

serviço mais frequentemente contratado, seguida pela pintura de meio-fio e por outros serviços, tanto manuais quanto mecanizados, além da varrição mecanizada e da capina. Por outro lado, os serviços de manutenção de cemitérios e limpeza de praias apresentam menor ocorrência nos contratos, sendo este último fato justificado pela ausência de faixa litorânea na maioria dos municípios analisados.

Na sequência, são apresentados os resultados das análises financeiras referentes aos serviços de limpeza urbana de forma individualizada, desconsiderando contratações realizadas de forma conjunta com outros serviços (Tabela 5).

Tabela 5. Análise financeira dos contratos com base nos serviços contratados

Serviço	Unidade de Medida	Nº de ocorrências	Municípios	Faixa de preço unitário (R\$)	Preço médio (R\$)	Período
Varrição manual	Km/eixo	7	João Neiva; Alegre; Castelo; Presidente Kennedy; Cariacica; Marechal Floriano; Vila Velha	72,50 – 128,32	91,04	Mensal
	Km (meio-fio/sarjeta)	4	Maratáizes; Anchieta; Piúma; Vitória	36,23 – 94,52	76,12	Mensal
	Km/ano	3	Ecoporanga; Apiacá; Iúna	73,10	73,10	Anual
	H/H	2	Vila Velha; Serra	26,38 – 29,41	27,89	Mensal
	Km/mês	1	Baixo Guandu	152,93	152,93	Semestral
	m²	1	Ibitirama	4,18	4,18	Anual
Varrição mecanizada	Km/eixo	3	Presidente Kennedy; Marechal Floriano; Vila Velha	27,32 – 60,00	49,11	Mensal
	Km (meio-fio/sarjeta)	3	Cariacica; Vitória; Serra	18,12 – 111,72	53,39	Mensal

	Km/ano	2	Lúna; Ecoporanga	80,75	80,75	Anual
Pintura de meio-fio (manual/mecanizada)	m²/ano	5	Apiacá; Ecoporanga; Marataízes; Ibitirama; Lúna	3,44 – 3,72	3,62	Anual
	M	3	Anchieta; Cariacica; Serra	0,41 – 1,38	0,78	Mensal
	m²	1	Piúma	4,53	4,53	Mensal
Capina manual	m²/ano	5	Ecoporanga; Apiacá; Marataízes; Ibitirama; Lúna	0,53 – 0,61	0,58	Anual
	m²	1	Piúma	1,33	1,33	Mensal
Capina mecanizada	Km/ano	3	Ecoporanga; Apiacá; Lúna	90,20	90,20	Anual
Limpeza de praças e áreas públicas	m²/ano	3	Ecoporanga; Apiacá; Lúna	0,58	0,58	Anual
Roçada manual/mecanizada	m²	3	Cariacica; Piúma; Vitória	0,63 – 1,52	1,17	Mensal
	m²/ano	2	Marataízes; Ibitirama	0,09 – 0,40	0,24	Anual
Limpeza de cemitério	H/H	2	Presidente Kennedy; Marechal Floriano	35,00	35,00	Mensal
Lavagem e desinfecção (feiras, vias, pátios)	m²	2	Cariacica; Vila Velha	0,34 – 1,05	0,69	Mensal
	Eq/dia	1	Vitória	1.318,82	1.318,82	Mensal
Limpeza manual de praia	Km	1	Piúma	489,91	489,91	Mensal
	H/H	1	Vila Velha	26,99	26,99	Mensal
Limpeza mecanizada de praia	Km	2	Vitória; Vila Velha	21,64 – 34,60	28,12	Mensal
Poda	Unidade	3	Piúma; Alegre; São Roque do Canaã	81,00 – 89,50	85,25	Anual
	Mês	1	Barra de São Francisco	10.000,00	10.000,00	Anual

Fonte: Elaborado pelo primeiro autor.

Não é possível realizar uma análise financeira comparativa com todos os dados para cada tipo de serviço, pois as unidades de medida não são

coincidentes. No entanto, é possível comparar os orçamentos dos serviços que possuem unidades equivalentes.

Relacionado à varrição manual, há registros de 7 municípios para a unidade km/eixo, com média de R\$ 91,04 no valor unitário, sendo que a maioria dos municípios apresentou valores próximos a esse. Destacam-se Cariacica e Marataízes, que divergiram significativamente, com R\$ 128,32 e R\$ 36,26, respectivamente. Outros 4 municípios realizaram seus orçamentos com as unidades km, km de meio-fio e km de sarjeta, que são equivalentes, apresentando média de R\$ 76,20, sem variação significativa entre as cidades. A unidade km/ano apareceu 3 vezes, com valores idênticos (R\$ 73,10). As unidades H/H, km/mês e m² também foram utilizadas, porém a baixa frequência de ocorrência não permite comparações.

Ao analisar os valores da varrição mecanizada, verifica-se grande variação, decorrente dos diferentes equipamentos utilizados, como varredeiras e sopradores costais. Comparando pela unidade km/eixo, Presidente Kennedy e Marechal Floriano apresentaram valores iguais, tendo contratado varrição mecanizada com sopradores costais, enquanto Vila Velha contratou o serviço com varredeiras, apresentando valor inferior.

Relacionados à pintura de meio-fio e outros, manual e mecanizada, 5 municípios contrataram o serviço pela unidade m²/ano, todos com valores próximos à média de R\$ 3,62. Na contratação por metro, o município de Anchieta apresentou valor superior aos demais com a mesma unidade. A unidade m² foi observada apenas em um município.

A capina manual é, em geral, contratada em m²/ano, com valores próximos à média entre os municípios. Já a capina mecanizada foi contratada na unidade km/ano nos 3 municípios analisados, todos com valores iguais de R\$ 90,20. O mesmo padrão foi observado para o serviço de limpeza de praças, pontes, parques de exposição e outros equipamentos públicos correlatos, com todos os municípios adotando a mesma unidade e o mesmo valor (R\$ 0,58/m²/ano).

A roçada manual e mecanizada aparece com duas unidades (m²/ano e m²), sendo 3 municípios para a primeira e 2 para a segunda. Entre os que

utilizaram m², o município de Piúma apresentou valor de R\$ 0,63, inferior aos demais. O serviço de poda também permite comparação, com 3 municípios contratando por unidade, apresentando valor médio de R\$ 85,35. Para os demais serviços, a comparação financeira é limitada, devido à ausência de unidades padronizadas ou ao reduzido número de municípios contratantes.

Cabe destacar que, em alguns contratos, os serviços são agrupados, sem detalhamento individual, o que inviabiliza a comparação de valores. Outro aspecto relevante é a falta de padronização das unidades de medida e a diversidade de formas de contratação, conforme observado na Tabela 4, dificultando a fiscalização e o monitoramento dos contratos, bem como a comparação dos gastos públicos. Isso ocorre em função da autonomia dos municípios na elaboração de seus contratos.

10. Conclusões e recomendações

Conclui-se, a partir deste trabalho, que os serviços de limpeza urbana são estruturados de forma diversificada e representam parcela significativa dos gastos municipais, sendo os municípios os principais responsáveis por sua execução. Observa-se que, com o objetivo de reduzir custos operacionais e otimizar a gestão, muitos municípios optam pela terceirização desses serviços, transferindo sua execução para empresas privadas.

Dentre os serviços analisados, a varrição apresenta elevada participação no custo total do manejo dos resíduos sólidos urbanos (RSU), sendo também um dos serviços mais frequentemente terceirizados. A unidade de medida mais adequada para sua contratação é R\$/km, por ser a mais recorrente nos contratos analisados. Verifica-se ainda que o custo médio desse serviço situa-se entre 98 e 106 R\$/km, conforme indicado pelas séries históricas do SNIS.

De modo geral, os municípios mais populosos são os que mais recorrem à contratação de empresas privadas para a execução dos serviços de limpeza urbana. No estado do Espírito Santo, foram identificados 29 contratos em 27 municípios nos portais de transparência, evidenciando a ampla adoção desse modelo de gestão.

Sob a perspectiva ambiental, a adequada execução dos serviços de limpeza urbana contribui diretamente para a redução da poluição do solo e dos recursos hídricos, além de minimizar a proliferação de vetores de doenças. A eficiência na coleta, varrição e manejo dos resíduos também favorece a conservação dos ecossistemas urbanos e melhora a qualidade de vida da população, reforçando a importância de uma gestão integrada, técnica e sustentável desses serviços.

Como recomendação, sugere-se que estudos futuros se concentrem na padronização das unidades de medida e na separação detalhada dos serviços contratados pelas prefeituras, de modo a aumentar a transparência e permitir uma fiscalização mais precisa dos gastos públicos.

Adicionalmente, recomenda-se a elaboração de uma matriz de referência de preços e custos dos serviços de limpeza urbana, baseada em estudos mais aprofundados que considerem as características locais e regionais, bem como a sazonalidade. Essa matriz deve incluir a análise dos principais insumos, como mão de obra, materiais, equipamentos, peças, uniformes e equipamentos de proteção individual (EPIs), contribuindo para maior precisão na estimativa de custos e subsidiando a tomada de decisão dos gestores públicos.

11. Referências

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 12980**: Coleta, varrição e acondicionamento de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1993. 6 p.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2011**. ABRELPE, São Paulo, 2011.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2021**. ABRELPE, São Paulo, 2021.

ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Nota sobre o uso de agrotóxicos em área urbana**. Brasília, 15 de janeiro de 2010.

BARROS, R. T. V. **Elementos de gestão de resíduos sólidos**. Belo Horizonte: Tessitura Editora, 2012. 59p.

BEL, G.; WARNER, M. Does privatization of solid waste and water services reduce costs? A review of empirical studies. **Resources, Conservation and Recyclin**, v. 52, p. 1337-1348. 2008.

BENITO-LÓPEZ, B.; MORENO-ENGUIX, M. R.; SOLANA-IBAÑEZ, J. Determinants of efficiency in the provision of municipal street-cleaning and refuse collection services. **Waste Management**, v. 31, p. 1099-1108. 2011.

BORGES, M. E. **Gerenciamento de Limpeza Urbana**. Viçosa: CPT, 2009. 324 p.

BRASIL. **Constituição (1988)**. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 16 jan. 2022.

BRASIL. Controladoria Geral da União. **Mapa Brasil Transparente**. Brasília, 2021a. Disponível em: https://mbt.cgu.gov.br/publico/avaliacao/escala_brasil_transparente/66#ranking. Acesso em: 23 jan. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022**. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, 2022. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2022/Decreto/D10936.htm#art91. Acesso em: 16 jan. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 6.017, de 17 de janeiro de 2007**. Regulamenta a Lei no 11.107, de 6 de abril de 2005, que dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos, Brasília 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/decreto/d6017.htm. Acesso em: 16 jan. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 7.217, de 21 de junho de 2010**. Regulamenta a Lei no 11.445, de 5 de janeiro de 2007a, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, e dá outras providências. Brasília, 2010a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7217.htm. Acesso em: 16 jan. 2022.

BRASIL. **Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005**. Dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos e dá outras providências. Brasília, 2005. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/lei/l11107.htm. Acesso em: 16 jan. 2022.

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007**. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico Brasília, 2007b. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: 16 jan. 2022.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, 2010b. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 16 jan. 2022.

BRASIL. **Lei Nº 14.133, de 1º de abril de 2021**. Lei de Licitações e Contratos Administrativos. Brasília, 2021. Disponível em:

<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.133-de-1-de-abril-de-2021-311876884>. Acesso em: 24 jan. 2022.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **Série Histórica – 2016 a 2020**. [online]. 2022. Disponível em: <http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica>. Acesso em: 05 jan. 2021.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2019**. Brasília: SNS/MDR, 2020. 244 p. Disponível em: http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2019/Diagnostico_RS2019.pdf. Acesso em: 20 nov. 2021.

CÂNDIDO, É. S.; CABRAL, M. D.; BORMA, V. S. **Manual para análise de serviços de Limpeza Urbana e Manejo dos Resíduos Sólidos**. Tribunal de contas dos municípios – Goiás (estado). Goiânia, 2020. 126 p.

CARVALHO, P; DOLLERY, B.; MARQUES, R. Is bigger better? An empirical analysis of waste management in New South Wales. **Waste Management**, v.39, p. 277–286.2015.

CEMPRE. Compromisso Empresarial Para Reciclagem. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado / Coordenação geral - André Vilhena**. – 4. ed. – São Paulo (SP): CEMPRE, 2018.

COUTO, M. C. L.; LANGE, L.C.; ROSA, R. DE A.; COUTO, P. R. L. Planning the location of facilities to implement a reverse logistic system of post-consumer 21 packaging using a location mathematical model. **Waste Management & Research**, v. 35, n. 12, p. 1254-1265. 2017.

COUTO, R. M. de S.; PIMENTA, C. R.; OLIVEIRA, L. F. P. O impacto da gestão do saneamento sobre a qualidade de vida nas regiões metropolitanas. **Revista Brasileira de Saneamento Ambiental**, v. 12, n. 4, p. 456-470, 2017.

D’ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. 2ª ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000. Publicação IPT 2622.

DUTRA, R. M. S. *et al.* Avaliação de metodologias de cobrança para o gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos para municípios brasileiros. In: **Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – SIBESA**, 14. 2018, Foz do Iguaçu, Anais. Paraná: 2018.

ESPÍRITO SANTO. **Lei nº 9.264, de 15 de julho de 2009**. Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos e dá outras providências correlatas. Disponível em: https://www.normasbrasil.com.br/norma/lei-9264-2009-es_126138.html. Acesso em: 17 jan. 2022.

GELLYNCK, X.; VERHELST, P. Assessing instruments for mixed household solid waste collection services in the Flemish region of Belgium. **Resources Conservation and Recycling**, v. 49, p. 372–387. 2007.

HALKOS, G., PETROU, K.N., 2019. Assessing 28 EU member states' environmental efficiency in national waste generation with DEA. **Journal of cleaner production**, n. 208, p. 509-521. 2019.

IBAM. Instituto Brasileiro de Administração Municipal. **Cartilha de Limpeza Urbana**. 1991. Disponível em: https://www.ibam.org.br/media/arquivos/estudos/cartilha_limpeza_urb.pdf. Acesso em: 20 jan. 2022.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1º de 2021**. 2021. Disponível em: https://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2021/estimativa_dou_2021.pdf. Acesso em: 23 jan. 2022.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos**. 2012. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf. Acesso em: 19 jan. 2022.

JACOBSEN, R.; BUYSSE, J. GELLYNCK, X. Cost comparison between private and public collection of residual household waste: Multiple case studies in the Flemish region of Belgium. *Waste Management*, v. 33, n. 1, p. 3-11. 2013.

KARAM, J.; CIN, G.; TILLY, J. Economic evaluation of waste minimization options. **Environmental Progress**, v. 7, n. 3, p. 192-197. 1988.

MONTEIRO, J. H, P. **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Coordenação técnica Victor Zular Zveibil. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. 200 p. Disponível em: <http://www.resol.com.br/cartilha4/manual.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2022.

NASCIMENTO, R. M.; COIMBRA, T. C. **Avaliação de metodologias de cobrança para o gerenciamento integrado de resíduos sólidos para municípios brasileiros**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

OLIVEIRA, S. R. dos S. M. de; SENRA, L. de B.; AMARAL, A. A. do; SOUZA, M. N. Análise de Sustentabilidade do Programa Gestágua: Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) no Município de Alegre-ES. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas Vol. X**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. p. 227-244. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-34-3.c8>

PEREZ-LOPEZ, G.; PRIOR, D.; ZAFRA-GÓMEZ, J.L.; PLATA-DÍAZ, A.M. Cost efficiency in municipal solid waste service delivery. Alternative management forms in 22 relation to local population size. **European journal of operational research**, n. 255, p. 583-592. 2016.

PWC. Price water house Coopers. **Guia de orientação para adequação dos Municípios à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)**. ABLP. 2019. Disponível em: http://www.ablp.org.br/pdf/Guia_PNRS_11_alterado.pdf. Acesso em: 09 abr. 2020.

ROMANO, G.; MOLINOS-SENANTE, M. Factors affecting eco-efficiency of municipal waste services in Tuscan municipalities: An empirical investigation of different management Models. **Waste Management**, v. 105, p. 384-394. 2020.

SARRA, A.; MAZZOCCHITTI, M.; RAPPOSELLI, A. Evaluating joint environmental and cost performance in municipal waste management systems through data envelopment analysis: scale effects and policy implications. **Ecological indicators**, v. 73, p. 756-771. 2017.

SEAMA. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Espírito Santo. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Espírito Santo**. Vitória. 562 p. 2019.

SILVA, C. A.; GARCIA, E. G.; COSTA, A. F. Viabilidade da terceirização dos serviços de limpeza urbana em município de Minas Gerais. **Revista de Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 3, n. 2, p. 123-137, 2007.

SILVA, N. S. *et. al.* Diagnóstico da viabilidade da terceirização do serviço de limpeza urbana: estudo de caso em um município de Minas Gerais. **VII Colóquio Redes estratégicas e inovação**. Minas Gerais, 2017.

SIMÕES, P.; CRUZ, N.F.; MARQUES, R.C. The performance of private partners in the waste sector. **Journal of cleaner production**, v. 29-30, p. 214-221. 2012.

SIMÕES, P.; MARQUES, R. C. On the economic performance of the waste sector: a literature review. **Journal of environmental management**, v. 106, p. 40-47. 2012.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Dados dos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos no estado do Espírito Santo (2016-2020)**. Disponível em: <https://www.snis.gov.br/>. Acesso em: 15 dez. 2024.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Glossário de Informações - Resíduos Sólidos Complementares**. Brasília, 2021a.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Glossário de Informações - Resíduos Sólidos Gerais**. Brasília, 2021b.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Perguntas Frequentes sobre o SNIS**. Brasília, 2019. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/perguntas-frequentes>. Acesso em: 24 jan. 2022.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **SNIS - Série Histórica**. Brasília, 2022. Disponível em: <http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/>. Acesso em: 24 jan. 2022.

SOUZA, A. F. *et. al.* **Manual técnico de poda de árvores**. Portarias intersecretariais. São Paulo, 2016.

SOUZA, M. N.; SILVA, M. A. A. Sustentabilidade das Organizações: gestão ética e sustentabilidade social. **Revista Competência**. v. 59, p.12-13, 2011.

TCEES. Tribunal de Contas do Espírito Santo. **Auditoria do TCE-ES aponta melhoria da transparência nos portais de prefeituras e câmaras.** Vitória, 2017. Disponível em: <https://www.tcees.tc.br/auditoria-do-tce-es-aponta-melhoria-da-transparencia-nos-portais-de-prefeituras-e-camaras/>. Acesso em: 23 jan. 2022.

TCERS. Tribunal de Contas do Rio Grande do Sul. **Manual de orientação técnica serviços de coleta de resíduos sólidos domiciliares:** desenvolvido pela Direção de Controle e Fiscalização Supervisão de Auditoria Municipal do Tribunal de Contas do Estado – abrelRS. 2ª Edição. Porto Alegre, 2019.

ZAGATO, F. L. **Manual de limpeza urbana.** Gráfica Proguaru S/A. Guarulhos-SP, 2009.

CAPÍTULO 10

Educação inclusiva e agroecologia: construindo caminhos de acessibilidade metodológica no ensino de ciências da natureza

Raquel Sueleni Cardoso Mariano, Krisley Camila Morais Lopes, Tamiris da Silva Gumiere, Willian Moreira da Costa, Atanásio Alves do Amaral, Clarissa Alves de Novaes, Gabriela Alves de Novaes, Maurício Novaes Souza

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-36-7.c10>

Resumo

A efetivação do direito à educação passa pela construção de práticas pedagógicas que considerem a heterogeneidade dos sujeitos e promovam condições reais de participação. Nesse cenário, o ensino de Ciências da Natureza pode assumir papel estratégico ao articular conhecimentos científicos com vivências concretas e acessíveis. Abordagens fundamentadas na agroecologia favorecem a criação de ambientes educativos dinâmicos, nos quais a aprendizagem ocorre por meio da experimentação, da interação com o meio e do engajamento coletivo. A utilização de recursos como hortas adaptadas, atividades ao ar livre e experiências multissensoriais possibilita a ampliação do acesso ao conhecimento por estudantes com diferentes necessidades, contribuindo para o desenvolvimento cognitivo, social e afetivo. Além disso, tais práticas estimulam valores como cooperação, autonomia e respeito às diferenças. A formação de professores, nesse contexto, deve priorizar a integração entre teoria e prática, incentivando a reflexão crítica e a valorização dos saberes locais. Ao promover estratégias pedagógicas que dialogam com a diversidade e com os princípios da sustentabilidade, fortalece-se um modelo educacional mais democrático, capaz de responder aos desafios contemporâneos e de contribuir para a construção de uma sociedade mais justa, inclusiva e ambientalmente responsável.

Palavras-chave: Acessibilidade educacional. Diversidade. Práticas interdisciplinares. Sustentabilidade. Aprendizagem sensorial. Formação docente.

1. Introdução

A educação, enquanto direito fundamental assegurado juridicamente, constitui um dos pilares para a promoção da dignidade humana e da justiça social, devendo ser garantida de forma universal, equitativa e inclusiva. Conforme estabelecido pela Constituição Federal de 1988, a educação é direito de todos e dever compartilhado entre Estado, família e sociedade, orientada ao pleno desenvolvimento do indivíduo. Nessa perspectiva, a efetivação da justiça educacional encontra estreita relação com a justiça socioambiental, especialmente quando articulada a abordagens como a agroecologia.

No âmbito normativo, a Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (Lei nº 9.394/1996) e a Lei Brasileira de Inclusão (Lei nº 13.146/2015) consolidam o compromisso com uma educação inclusiva, equitativa e de qualidade. Complementarmente, a Política Nacional de Educação Especial na Perspectiva da Educação Inclusiva (2008) amplia esse entendimento ao defender a escolarização de todos os estudantes nos sistemas regulares de ensino, com a oferta de serviços e recursos de apoio que assegurem sua participação e aprendizagem.

Paralelamente, a agroecologia configura-se como um campo científico e prático de natureza interdisciplinar, fundamentado na aplicação de princípios ecológicos ao manejo sustentável dos agroecossistemas. Para além de sua dimensão técnico-produtiva, a agroecologia incorpora valores éticos e políticos, como a valorização da diversidade, a cooperação e a equidade social. Tais princípios apresentam convergência direta com os fundamentos da educação inclusiva, ao reconhecerem a pluralidade dos sujeitos e a necessidade de construção de ambientes que respeitem e potencializem as diferenças.

Sob essa ótica, a inclusão escolar pode ser compreendida como um processo estruturante que demanda a reconfiguração das práticas pedagógicas, das culturas institucionais e das políticas educacionais. Assim como a agroecologia propõe a transição de modelos convencionais para sistemas mais sustentáveis e resilientes, a educação inclusiva requer a superação de paradigmas homogêneos, orientando-se por práticas pedagógicas flexíveis, contextualizadas e centradas na diversidade humana (Figura 1).



Figura 1. Interseção entre educação inclusiva e agroecologia: vivências pedagógicas integradoras em sala de aula e horta escolar. Fonte: elaborado por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (ChatGPT).

Essa articulação entre inclusão e agroecologia é reforçada por marcos internacionais, como a Declaração de Salamanca (1994), que estabelece a educação inclusiva como princípio fundamental para sistemas educacionais democráticos. Nesse sentido, a adoção de práticas pedagógicas inclusivas não apenas assegura o direito à educação, mas também contribui para a formação de sujeitos críticos e para a construção de uma sociedade mais justa, sustentável e socialmente comprometida.

2. A Biologia no cotidiano: elemento concreto para a inclusão e a consciência ambiental

A Biologia, enquanto ciência que investiga a vida em suas múltiplas dimensões, ocupa papel central na formação do pensamento científico e na construção da consciência ambiental. Sua abordagem permite compreender desde os níveis mais básicos da organização biológica até as complexas interações entre organismos e ambiente, contribuindo para a formação de sujeitos críticos e sensíveis às questões socioambientais. Os Parâmetros Curriculares Nacionais destacam que as principais áreas de interesse da

Biologia contemporânea estão voltadas à compreensão da vida e de seus processos, evidenciando sua relevância no contexto educacional (Brasil, 2015).

A articulação entre os conteúdos biológicos e o cotidiano dos estudantes constitui um dos pilares para a promoção de uma aprendizagem significativa. Conforme proposto por Ausubel (2003), o processo de aprendizagem ocorre de maneira mais efetiva quando novas informações se relacionam com conhecimentos prévios já estruturados na mente do aprendiz. Nessa mesma direção, Moura e Orsano (2024) reforçam que a contextualização dos conteúdos favorece a construção de sentidos e amplia o engajamento dos estudantes. Assim, ao aproximar a Biologia das experiências vividas, como práticas agrícolas, relações com o ambiente local e observação da natureza, o ensino torna-se mais acessível, inclusivo e relevante (Figura 2).

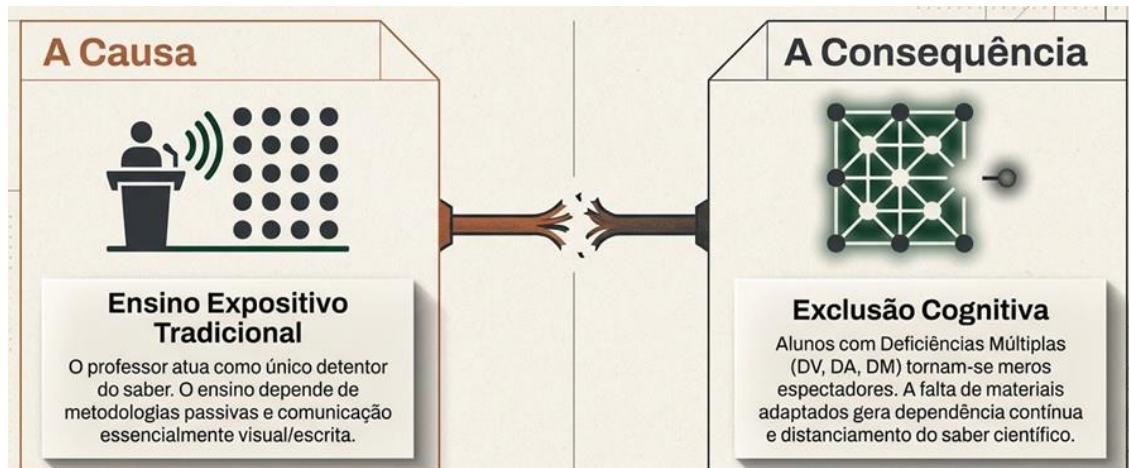


Figura 2. O paradigma da dependência visual: barreiras do ensino tradicional e a exclusão cognitiva. Fonte: elaborado por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Superar esse paradigma de exclusão exige mais do que apenas novas técnicas; requer uma mudança na percepção do mundo. Nesse sentido, no cenário contemporâneo, marcado por intensas transformações ambientais, a educação científica assume também a responsabilidade de contribuir para a formação de uma racionalidade ambiental crítica. Leff (2011), bem como Mendes *et al.* (2024), argumentam que a crise ambiental evidencia os limites da racionalidade dominante, exigindo a construção de novos paradigmas baseados na integração entre saberes científicos e conhecimentos tradicionais. Nesse

contexto, o ensino de Biologia se apresenta como ferramenta fundamental para a compreensão da complexidade dos problemas ambientais e para o desenvolvimento de práticas sustentáveis.

Sob a perspectiva da agroecologia, essa integração torna-se ainda mais evidente. A compreensão da biodiversidade, dos ciclos biogeoquímicos e das interações ecológicas constitui a base para o manejo sustentável dos agroecossistemas. Como destacam Altieri (2012), Oliveira e Oliveira (2024) e Sousa (2025), os sistemas agroecológicos valorizam a diversidade biológica, os processos naturais e os saberes tradicionais, promovendo não apenas a sustentabilidade ambiental, mas também a justiça social e a autonomia dos sujeitos envolvidos (Figura 3).

Dimensões	Modelo Passivo	Metodologias Ativas (ABP / EnCI)
Papel do Aluno	Mero espectador / reprodutor.	Protagonista investigativo.
Papel do Professor	Detentor e transmissor do conhecimento.	Mediador de espaços dialógicos.
Estímulo Sensorial	Monossensorial (foco visual/escrito).	Multissensorial (tato, áudio, cinestesia).
Resultado Cognitivo	Memorização e dependência.	Metacognição e resolução autônoma de problemas reais.

Figura 3. A transição para a autonomia investigativa: comparativo entre o modelo passivo e as metodologias ativas sob as dimensões do ensino de ciências. Fonte: elaborado por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Essa transição para a autonomia investigativa pressupõe um olhar atento à singularidade de cada sujeito. Sob essa ótica, no campo da educação inclusiva, torna-se imprescindível reconhecer que os processos de aprendizagem se manifestam de formas diversas. A perspectiva histórico-cultural de Vygotsky (1989) contribui significativamente para essa compreensão ao afirmar que o desenvolvimento humano não ocorre de maneira uniforme, mas é mediado por fatores sociais, culturais e históricos. Nesse sentido, estudantes com deficiência não apresentam limitações em seu potencial de aprendizagem,

mas desenvolvem-se por meio de trajetórias diferenciadas, o que exige práticas pedagógicas flexíveis, sensíveis e diversificadas.

Experiências desenvolvidas em escolas do campo e em projetos socioambientais evidenciam que o contato direto com a natureza constitui um potente mediador da aprendizagem. Tais vivências favorecem não apenas a compreensão de conceitos biológicos, mas também o fortalecimento de vínculos com o território e a valorização dos saberes locais. Autores como Freire (1996), Oliveira e Oliveira (2024) e Santos, Sousa e Ferreira (2021) destacam a importância de práticas educativas dialógicas, que considerem o contexto sociocultural dos estudantes e promovam a construção coletiva do conhecimento (Figura 4).



Figura 4. O ecossistema de inclusão: a convergência entre Educação Especial, Educação do Campo e Ciências da Natureza para uma aprendizagem autônoma. Fonte: elaborado por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Nessa perspectiva, a Biologia ultrapassa sua dimensão estritamente conceitual e passa a ser compreendida como uma ciência da vida e da convivência, articulando conhecimento científico, experiência sensível e responsabilidade socioambiental. Estudos como os de Santos (2018), Pereira *et al.* (2020), Dias (2021) e Fernandes *et al.* (2024) reforçam que práticas

pedagógicas baseadas na vivência, na experimentação e na valorização da diversidade contribuem significativamente para a promoção da inclusão e da consciência ambiental.

Dessa forma, a acessibilidade metodológica deixa de ser um ajuste técnico para tornar-se uma postura ética diante do processo de ensinar e aprender. Assim, ao integrar o cotidiano, a diversidade de sujeitos e os princípios da sustentabilidade, o ensino de Biologia consolida-se como um instrumento estratégico para a construção de uma educação mais inclusiva, crítica e comprometida com a transformação social e ambiental.

3. Acessibilidade metodológica como prática agroecológica no ensino de Ciências

A acessibilidade metodológica refere-se à eliminação de barreiras nos processos de ensino e aprendizagem, de modo a assegurar que todos os estudantes tenham condições equitativas de acesso ao conhecimento (Fávero; Costa, 2014). Conforme Sassaki (2009), essa acessibilidade se materializa na diversificação de estratégias pedagógicas, no uso de materiais adaptados e na consideração das diferentes formas de aprender, incluindo abordagens baseadas em múltiplas linguagens e experiências sensoriais.

Nesse sentido, a acessibilidade metodológica configura-se como um dos pilares da educação inclusiva, pois ultrapassa a noção de acesso físico à escola e incorpora a garantia de aprendizagem significativa. Mendes (2006) e Viana e Almeida (2024) destacam que a inclusão escolar deve assegurar não apenas o ingresso dos estudantes, mas também sua permanência e pleno desenvolvimento, o que implica a adoção de práticas pedagógicas responsivas à diversidade (Figura 5).

Esses princípios dialogam diretamente com a agroecologia, que compreende a diversidade como elemento estruturante dos sistemas sustentáveis. Ao reconhecer a heterogeneidade como potencial, e não como limitação, a agroecologia oferece referenciais teóricos e práticos que podem inspirar práticas educativas mais inclusivas. Nesse contexto, atividades experimentais e vivenciais no ensino de Ciências favorecem a construção de

esquemas cognitivos mais elaborados, especialmente para estudantes com deficiência, ao possibilitarem a aprendizagem por meio da interação direta com o ambiente (Robledo *et al.*, 2015).



Figura 5. Dimensões da acessibilidade: pilares para uma educação inclusiva e sustentável. Fonte: elaborado por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Dentre esses pilares, a formação docente ganha especial relevância quando integrada à construção do conhecimento agroecológico, conforme Caporal e Costabeber (2002) fundamentam-se no diálogo entre saberes científicos e tradicionais, na valorização da diversidade e na adoção de uma postura pedagógica crítica e reflexiva. Essa perspectiva amplia o papel do educador, que passa a atuar como mediador de processos de aprendizagem contextualizados, sensíveis às realidades socioculturais dos estudantes.

Além disso, a agroecologia configura-se como um espaço formativo potente para a promoção da inclusão social e educacional, ao possibilitar vivências que reconhecem os direitos, as capacidades e as singularidades dos sujeitos. O intercâmbio de experiências e a construção coletiva do conhecimento favorecem abordagens alinhadas à teoria das inteligências múltiplas, ampliando as formas de participação e expressão dos estudantes (Souza, 2024).

Sob a ótica da psicologia histórico-cultural, Vygotsky (1989) ressalta que o desenvolvimento humano ocorre por meio das interações sociais e da mediação pedagógica. Assim, cabe ao professor organizar estratégias didáticas que

considerem as especificidades dos estudantes, promovendo situações de aprendizagem que estimulem a autonomia, a participação e o desenvolvimento integral.

Refletir criticamente sobre os modelos educacionais vigentes possibilita a construção de alternativas pedagógicas mais humanizadas, baseadas na integração entre saberes tradicionais, educação não formal e práticas culturais. Essa abordagem dialoga com os princípios da transição agroecológica, ao propor uma educação comprometida com a sustentabilidade, a equidade e a valorização da diversidade (Souza, 2024) (Figura 6).

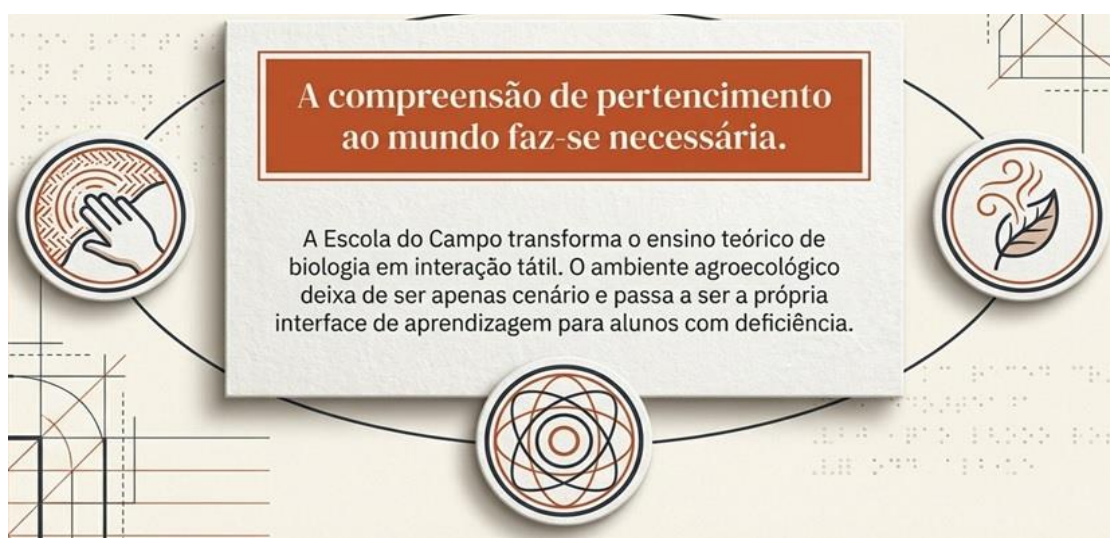


Figura 6. Estratégia I: espaços de pertencimento e a transição do conhecimento teórico para a experiência tátil na escola do campo. Fonte: elaborado por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Adicionalmente, a acessibilidade metodológica implica a incorporação de múltiplas linguagens, visuais, táteis, auditivas e corporais, ampliando as possibilidades de compreensão no ensino de Ciências (Sassaki, 2009; Mendes, 2006; Viana; Almeida, 2024). Tal diversidade de estratégias favorece não apenas estudantes com deficiência, mas enriquece o processo educativo como um todo. Ao transformar o espaço escolar em um local de experiência vivida, o pertencimento torna-se a base sobre a qual se constrói a autonomia.

Dessa forma, a articulação entre acessibilidade metodológica e agroecologia contribui para a consolidação de um ensino de Ciências mais

democrático, participativo e contextualizado. Nessa perspectiva, a diversidade deixa de ser um desafio a ser superado e passa a ser reconhecida como elemento central do processo educativo, constituindo um princípio comum tanto à educação inclusiva quanto à agroecologia (Mendes, 2006; Altieri, 2009; Viana; Almeida, 2024).

4. Hortas, laboratórios e espaços pedagógicos como ambientes inclusivos na agroecologia

As hortas escolares, viveiros, trilhas ecológicas e laboratórios didáticos configuram-se como espaços pedagógicos estratégicos para a implantação de práticas inclusivas e agroecológicas no ensino de Ciências. Tais ambientes favorecem a articulação entre teoria e prática, permitindo que o processo de aprendizagem se desenvolva de forma contextualizada, experiencial e significativa. Nessa perspectiva, a vivência direta com o meio assume papel central, conforme destacado por Dewey (1938), ao defender a experiência como fundamento do conhecimento, e reforçado por estudos recentes (Benatti, 2024; Ramos, 2024).

Além disso, a aprendizagem nesses espaços é potencializada quando os conteúdos científicos se conectam aos conhecimentos prévios dos estudantes, conforme a teoria da aprendizagem significativa de Ausubel (2003), ampliada por Moura e Orsano (2024). Essa integração favorece a construção de sentidos, o engajamento e a participação ativa, especialmente em contextos inclusivos, nos quais é necessário considerar diferentes formas de percepção e interação com o conhecimento.

Um exemplo emblemático dessa abordagem foi desenvolvido no Espaço ViVA Geomata da UFRJ, por meio de um circuito sensorial imersivo que integrou arte, educação ambiental e acessibilidade. Nessa atividade, os participantes percorreram o espaço com os olhos vendados, orientando-se pelos sentidos do tato, olfato e audição, em interação direta com elementos naturais. A proposta possibilitou não apenas a sensibilização ambiental, mas também a reflexão sobre a importância da acessibilidade em espaços educativos, ao evidenciar

outras formas de percepção e construção do conhecimento (Souza, 2024) (Figuras 7 e 8).

Ao vivenciar dinâmicas como as do Espaço ViVA Geomata, os estudantes percebem que o conhecimento biológico não depende exclusivamente da visão. Nesse contexto, a agroecologia revela-se como uma abordagem pedagógica potente, ao promover a integração entre ser humano e natureza de forma lúdica, sensorial e inclusiva.



Figuras 7 e 8. Imersão e percepção: oficina de sensibilização ambiental no Espaço ViVA Geomata, Agosto 2022. Participantes vivenciando o circuito sensorial com privação visual. Fonte: Souza, 2024.

O uso desses espaços como ambientes de convivência e aprendizagem contribui para o desenvolvimento do pensamento científico, estimulando a observação, a investigação e a formulação de hipóteses, conforme apontado por Gouveia (2017). Simultaneamente, essas práticas favorecem o bem-estar, o vínculo com o território e a valorização da biodiversidade.

A construção de ambientes acessíveis nesses espaços é um elemento fundamental para a efetivação da inclusão. Iniciativas como a implementação de canteiros elevados para pessoas com mobilidade reduzida, a utilização de pisos táteis para orientação, a identificação de espécies por meio de etiquetas em braille e a disponibilização de ferramentas adaptadas ampliam significativamente

as possibilidades de participação (Figura 9). Tais estratégias não apenas removem barreiras físicas, mas também promovem o reconhecimento das diferentes formas de existência e aprendizagem (Souza, 2024).

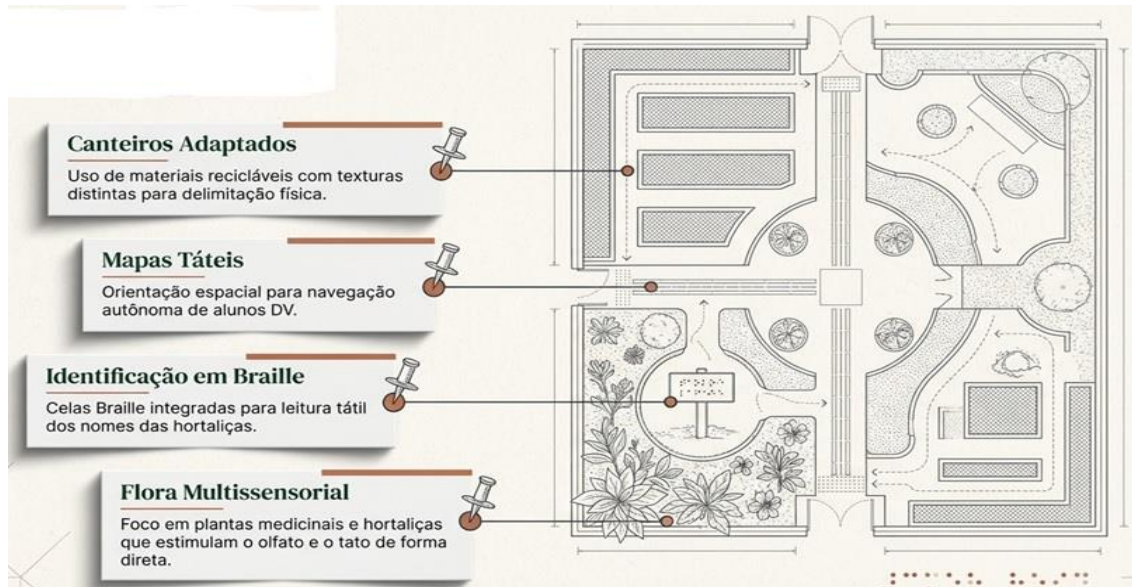


Figura 9. Anatomia da horta sensorial: recursos de tecnologia assistiva e acessibilidade metodológica em espaços agroecológicos. Fonte: elaborado por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Ao assegurar essas condições materiais de participação, a horta deixa de ser apenas um espaço de cultivo para se tornar um ambiente de vida. Dessa forma, os espaços pedagógicos agroecológicos, quando concebidos sob a perspectiva da acessibilidade metodológica, tornam-se territórios de pertencimento, nos quais a diversidade é acolhida e valorizada. Conforme Coqueiro *et al.* (2023), esses ambientes contribuem para a construção de uma educação mais sensível, democrática e inclusiva, ao integrar dimensões cognitivas, afetivas e sociais no processo educativo. Assim, consolidam-se como importantes ferramentas para a formação de sujeitos críticos, autônomos e comprometidos com a sustentabilidade e a justiça socioambiental.

5. Formação de educadores para uma prática agroecológica e inclusiva

A consolidação de uma educação que integre os princípios da agroecologia e da inclusão está intrinsecamente vinculada à formação de educadores. Nesse

contexto, o professor assume papel central como mediador de processos de aprendizagem que considerem, simultaneamente, a diversidade humana e os desafios socioambientais contemporâneos. Tal formação exige o desenvolvimento de uma prática pedagógica crítica, reflexiva e sensível às realidades locais, conforme destacado por Interaminense (2019).

De acordo com Santos e Oliveira (2016), o planejamento pedagógico deve ser construído a partir das vivências, necessidades e potencialidades dos estudantes, o que implica reconhecer o contexto sociocultural como elemento estruturante do processo educativo. Essa abordagem demanda, por parte do educador, não apenas domínio dos conteúdos científicos, mas também competências relacionais, como empatia, escuta ativa, criatividade e disposição para o diálogo interdisciplinar (Figura 10).

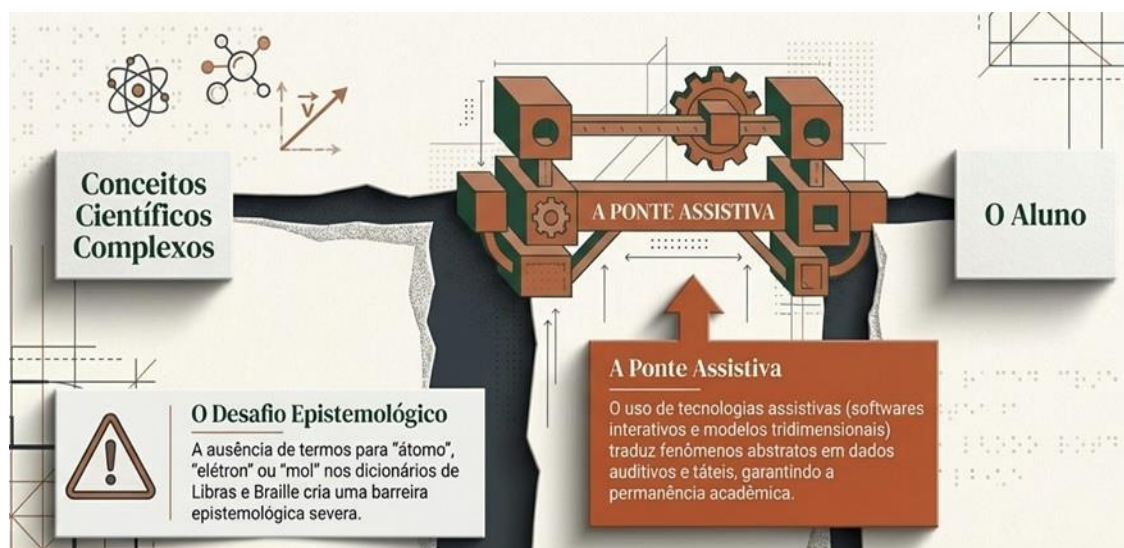


Figura 10. Estratégia II: tecnologias assistivas como pontes de mediação entre o saber científico e a diversidade cognitiva, superando desafios epistemológicos. Fonte: elaborado por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Essa mediação pedagógica, ao superar barreiras epistemológicas, materializa uma nova forma de ensinar e aprender. A educação em agroecologia, nesse sentido, propõe uma articulação entre natureza, trabalho e cultura, orientando-se por uma perspectiva formativa crítica e emancipatória. Em contraposição a modelos educacionais centrados na lógica produtivista, essa abordagem valoriza a vida em suas múltiplas dimensões, promovendo princípios como solidariedade, cooperação e respeito às diversidades: sejam elas de

ordem biológica, cultural, étnica, de gênero ou geracional (Dias, 2021). Assim, a prática educativa agroecológica contribui para a formação de sujeitos comprometidos com a sustentabilidade e a justiça social.

Ao integrar saberes científicos, populares e escolares, a agroecologia amplia as possibilidades pedagógicas, configurando-se como um campo fértil para práticas educativas transformadoras. Paralelamente, a educação inclusiva exige a superação de abordagens homogêneas de ensino, demandando a adoção de metodologias diversificadas que reconheçam e valorizem as distintas formas de aprender. Nesse sentido, a convergência entre agroecologia e inclusão fortalece uma pedagogia centrada na diversidade e na equidade (Figura 11).



Figura 11. O ciclo investigativo multissensorial: etapas da construção do conhecimento científico sob a perspectiva da acessibilidade metodológica. Fonte: elaborado por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Esse exercício de investigação e autonomia, ao ser vivenciado no ambiente da horta, materializa os princípios de uma ética do cuidado. A educação ambiental emerge, nesse cenário, como um eixo articulador, ao promover a reflexão crítica sobre as relações entre sociedade e natureza e estimular a construção de novos paradigmas de consciência ecológica. Conforme Dias (2021) trata-se de um processo educativo contínuo, voltado à formação de

valores, atitudes e práticas comprometidas com a sustentabilidade e a transformação social.

A formação de educadores alinhada a esses princípios requer investimentos consistentes em políticas públicas, programas de formação continuada e incentivo à pesquisa-ação, entendida como estratégia que articula teoria e prática na resolução de problemas concretos. Ademais, à luz da perspectiva histórico-cultural, Vygotsky (2019) ressalta que a aprendizagem se constitui nas interações sociais mediadas, o que reforça a necessidade de professores preparados para reconhecer, acolher e potencializar a diversidade presente nos contextos educativos.

Dessa forma, formar educadores para uma prática agroecológica e inclusiva implica promover uma mudança paradigmática na educação, orientada por valores humanísticos, pela valorização dos saberes plurais e pelo compromisso com a construção de uma sociedade mais justa, democrática e ambientalmente sustentável (Figura 12).



Figura 12. Superando barreiras estruturais: do diagnóstico de limitações escolares à implantação de soluções sistêmicas na educação agroecológica inclusiva. Fonte: elaborado por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Em última análise, a intersecção entre a agroecologia e a acessibilidade metodológica revela que o verdadeiro desafio da educação científica

contemporânea não reside na complexidade dos conteúdos, mas na capacidade de tornar esses saberes sensíveis e partilháveis. Ao transformar a horta em um laboratório vivo e multissensorial, rompe-se com a hegemonia de modelos de ensino excludentes, permitindo que a diversidade humana seja celebrada como a maior riqueza do processo de aprendizagem.

Assim, ao superar as barreiras estruturais e atitudinais evidenciadas, consolida-se uma práxis educativa que não apenas ensina sobre a vida, mas que se faz, intrinsecamente, um exercício de convivência, equidade e justiça socioambiental. Diante desse cenário, as reflexões apresentadas a seguir buscam sintetizar as principais contribuições desta proposta para a democratização do ensino de Ciências.

6. Considerações

A articulação entre agroecologia e inclusão escolar configura-se como uma abordagem educativa robusta e inovadora, que transcende os limites das práticas pedagógicas e produtivas convencionais. Ao integrar princípios como diversidade, equidade, acessibilidade e sustentabilidade, essa perspectiva amplia o papel social da educação, posicionando-a como instrumento estratégico no enfrentamento das desigualdades e na promoção de sociedades mais justas e ambientalmente responsáveis.

Quando orientada por fundamentos inclusivos, a agroecologia ressignifica os espaços escolares e comunitários, transformando-os em territórios pedagógicos vivos e dinâmicos. Nesses ambientes, o contato direto com a natureza, a valorização dos saberes locais e a adoção de metodologias acessíveis e multissensoriais favorecem processos de aprendizagem e de alfabetização científicos mais significativos, participativos e contextualizados. Experiências como circuitos sensoriais, hortas adaptadas e atividades de campo demonstram que é possível construir práticas educativas que reconheçam e acolham a diversidade humana em suas múltiplas dimensões, potencializando diferentes formas de percepção, interação e construção do conhecimento.

Nesse cenário, a formação de educadores assume papel central. Torna-se imprescindível preparar profissionais capazes de articular conhecimentos

científicos, saberes tradicionais, tecnologias digitais mediadoras e práticas pedagógicas inclusivas, desenvolvendo uma atuação crítica, reflexiva e comprometida com as transformações socioambientais. A educação em agroecologia, nesse sentido, deve ser compreendida como uma prática política e emancipatória, fundamentada em uma pedagogia que respeite os tempos ecológicos e humanos, e que dialogue de maneira consistente com os desafios contemporâneos da inclusão, da sustentabilidade e da justiça social.

Adicionalmente, é importante reconhecer que a consolidação dessa abordagem demanda o fortalecimento de políticas públicas educacionais, o investimento em formação continuada e a ampliação de iniciativas de pesquisa e extensão que integrem escola, comunidade e território. A promoção de práticas interdisciplinares e participativas contribui para a construção de uma cultura educacional mais democrática, na qual estudantes e educadores atuem como sujeitos ativos na produção do conhecimento e na conquista de sua autonomia intelectual.

Promover a agroecologia inclusiva, portanto, não se limita à adoção de estratégias pedagógicas diferenciadas, mas constitui um compromisso ético, social e ambiental. Trata-se de reconhecer que a diversidade, seja biológica, cultural ou humana, representa a base para a construção de sistemas resilientes e sustentáveis. Ao valorizar essa diversidade como princípio estruturante, a educação contribui para o florescimento de sociedades mais equitativas, solidárias e em equilíbrio com o planeta, reafirmando seu papel transformador diante dos desafios do século XXI.

7. Referências

- ALTIERI, M. A. **Agroecologia:** bases científicas para uma agricultura sustentável. São Paulo: Expressão Popular. 2009.
- AUSUBEL, D. P. **Aquisição e retenção de conhecimentos:** uma perspectiva cognitiva. Lisboa: Plátano, 2003.
- BENATTI, L. P. Ensino de sustentabilidade: a função pedagógica das hortas escolares. **Mix Sustentável**, v. 10, n. 5, p. 111-121, 2024.
- BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil:** promulgada em 8 de outubro de 1988. Disponível em:

https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm. Acesso em: 20 maio 2024.

BRASIL. **Lei nº 13.146/2015.** Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência (Estatuto da Pessoa com Deficiência). Diário Oficial da União. Poder Executivo. Brasília, DF. 2015. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/lei/l13146.htm. Acesso em: 20 maio 2024.

BRASIL. **Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996.** Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional. Brasília, DF: Presidência da República, 1996.

BRASIL. **Parâmetros Curriculares Nacionais:** Ensino Médio. Orientações educacionais complementares aos parâmetros curriculares nacionais: Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília, DF: Ministério da Educação, MEC, 2015. Disponível em: <https://gedh-uerj.pro.br/documentos/parametros-curriculares-nacionais-ensino-medio-orientacoes-educacionais-complementares-aos-parametros-curriculares-nacionais-ciencias-da-natureza-matematica-e-suas-tecnologias>. Acesso em: 21 nov. 2024.

BRASIL. **Política Nacional de Educação Especial na Perspectiva da Educação Inclusiva.** Brasília, DF: Ministério da Educação, 2008. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/arquivos/pdf/politicaeducspecial.pdf>. Acesso em: 20 maio 2024.

CAPORAL, F. R.; COSTABEBER, J. A. **Agroecologia:** enfoques científicos e estratégicos. Brasília: MDA/FAO. 2002.

COQUEIRO, E. O. *et al.* Acessibilidade metodológica nos laboratórios de química dos institutos federais: uma análise teórica e normativa. **Anais... IX CONEDU**, Campina Grande: Realize Editora, 2023. Disponível em: https://www.editorarealize.com.br/editora/anais/conedu/2023/TRABALHO_COM_PLETO_EV185_MD1_ID12759_TB1449_20112023113512.pdf. Acesso em: 28 out. 2024.

DEWEY, J. **Experiência e educação.** São Paulo: Nacional, 1971.

DIAS, A. P. *et al.* **Dicionário de agroecologia e educação.** Expressão popular: Rio de Janeiro: Escola Politécnica de Saúde Joaquim Venâncio, 2021.

DIAS, G. F. **Educação ambiental:** princípios e práticas. 9. ed. São Paulo: Gaia, 2004.

FÁVERO, C. H.; COSTA, H. G. **Inclusão:** a acessibilidade como garantia de educação de qualidade. XI Simpósio de excelência em Gestão e tecnologia. 2014.

FERNANDES L. G. G.; LIMA, J. F.; SANTOS, H. S.; VASCONCELOS, S. O. S.; MENDES, F. R. S.; SILVA, F. M. M.; JALLES, L. R. A educação ambiental no ensino e na prática escolar: uma revisão abrangente. **Revista Sociedade Científica**, v. 7, n. 1, 2024. DOI: <https://doi.org/10.61411/rsc202444017>.

FREIRE, P. **Pedagogia da autonomia**: saberes necessários à prática educativa. São Paulo: Paz e Terra, 1996.

GOUVEIA, R. V. S. **As atividades práticas e experimentais no ensino de ciências da natureza no ensino médio em uma escola estadual do Amazonas**. 2017, 92 f. Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2017.

INTERAMINENSE, B. K. S. A Importância das aulas práticas no ensino da Biologia: Uma Metodologia Interativa. **Id on Line Rev. Mult. Psic.**, 2019, v.13, n. 45 SUPLEMENTO 1, p. 342-354. ISSN: 1981-1179.

LEFF, E. **Saber ambiental**: sustentabilidade, racionalidade, complexidade, poder. 9. ed. Petrópolis: Vozes, 2011.

MANTOAN, M. T. E. Inclusão escolar de deficientes mentais: que formação para professores? In: MANTOAN, M. T. E. (Org.) **A integração de pessoas com deficiência**: contribuições para uma reflexão sobre o tema. São Paulo: Memnon; SENAC, 1997.

MENDES, E G. A radicalização do debate sobre inclusão escolar no Brasil. **Revista Brasileira de Educação**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 33, p. 387-405, 2006.

MENDES, J. E.; MEDEIROS, E. A.; OLIVEIRA, A. P.; OLIVEIRA NETO, J. J. Educação agroecológica e educação do campo: duas faces de um mesmo desafio. **Revista Brasileira de Educação Ambiental**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.34024/revbea.2024.v9.15828>.

MOURA, F. K. T. de; ORSANO, A. C. F. O ensino de Ciências no contexto da educação inclusiva: uma revisão de literatura. **Revista de Ensino, Educação e Ciências Humanas**, v. 25, n. 1, p. 130-138, 2024.

PEREIRA, R. J. B.; SILVA, J. S.; OLIVEIRA, M. C.; SOUSA, A. R. Método tradicional e estratégias lúdicas no ensino de Biologia para alunos de escola rural do município de Santarém-PA. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 15, n. 2, p. 106-123, 2020.

RAMOS, R. C. **Horta agroecológica como prática pedagógica**: educação ambiental no ensino fundamental I. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Práticas Pedagógicas) - Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2024.

ROBLEDO, A. G. *et al.* Aulas práticas de botânica no Instituto Superior de Ciências de Educação do Huambo, Angola. Cuiabá. **Revista da Rede Amazônica de Educação em Ciências e Matemática**, v. 1, n. 3, p. 42-51. 2015.

SANTOS, J. M. C. T.; OLIVEIRA, M. B. Contexto escolar e sentidos de educação de qualidade para o ensino médio. **Educação Unisinos**, São Leopoldo-RS, v. 20, n. 1, p. 39-47, 2016.

SANTOS, S. L. F.; SOUSA, R. P.; FERREIRA, C. P. Educação ambiental e agroecologia: entrelaçar de saberes nas escolas rurais.

REMEA - Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental, v. 38, n. 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.14295/remea.v38i1.12210>

SASSAKI, R. K. Inclusão: acessibilidade no lazer, trabalho e educação. **Revista Nacional de Reabilitação (Reação)**, São Paulo, Ano XII, mar./abr. 2009, p. 10-16.

SASSAKI, R. K. **Inclusão**: o paradigma do século 21. In: *Inclusão: Revista da Educação Especial*. 2005.

SOUSA, E. A. de. **Quintais agroecológicos**: ferramenta de educação ambiental e sustentabilidade no Ifes Campus de Alegre - ES. 76 f. Dissertação (Mestrado em Agroecologia) - Instituto Federal do Espírito Santo, Campus de Alegre, Alegre, 2025.

SOUZA, V. S. As abordagens multidisciplinares da agroecologia e reflexões sobre metodologias para promover a acessibilidade ambiental e a transição agroecológica-sensibilização ambiental através das artes e suas interfaces. **Cadernos de Agroecologia**, v. 19, n. 1, 2024.

VIANA, R. S. de A.; ALMEIDA, D. H. **de**. Educação inclusiva no ensino de Ciências e Biologia: uma perspectiva a partir da formação docente. **Research, Society and Development**, v. 13, n. 9, 2024.

VYGOTSKY, L. S. Obras Completas - Tomo Cinco: **Fundamentos de Defectologia**. / Tradução do Programa de Ações Relativas às Pessoas com Necessidades Especiais (PEE); revisão da tradução por Guillermo Arias Beatón. Cascavel, PR: EDUNIOESTE, 2019.

VYGOTSKY, L. S. **Pensamento e linguagem**. São Paulo: Martins Fontes, 1989.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Volume V de *Tópicos em Gestão Ambiental* reuniu estudos que articularam práticas sustentáveis na agricultura, na conservação ambiental, na gestão dos recursos hídricos e no desenvolvimento rural no Espírito Santo, evidenciando a importância de sistemas produtivos resilientes, inovadores e socialmente inclusivos. A obra percorreu diferentes dimensões da sustentabilidade ao apresentar a agroecologia como base integradora, destacando seus benefícios ambientais, sociais e econômicos, com ênfase na melhoria da qualidade do solo, no fortalecimento das comunidades e na segurança alimentar, além de sua contribuição para a mitigação das mudanças climáticas. Nesse contexto, a gestão ambiental se consolidou como eixo estruturante, orientando o planejamento, a execução e a avaliação das práticas sustentáveis.

Ao abordar a defesa vegetal em sistemas agroecológicos, evidenciou-se o papel dos mecanismos naturais das plantas e das interações ecológicas no controle de pragas e doenças, reforçando a importância do manejo equilibrado do solo e da microbiota. No campo da produção animal, os sistemas integrados, como ILPF, SAFs e silvipastoris, foram apresentados como alternativas capazes de promover conforto térmico, bem-estar animal e recuperação ambiental, contribuindo para maior equilíbrio dos sistemas produtivos. Em todos esses cenários, a gestão ambiental atuou como ferramenta essencial para integrar os componentes produtivos e ecológicos, promovendo eficiência e sustentabilidade.

A obra também discutiu estratégias de enfrentamento da degradação ambiental, destacando a agroecologia e políticas públicas como o Pagamento por Serviços Ambientais, que incentivaram práticas conservacionistas e a geração de renda. Nesse contexto, o uso de resíduos orgânicos na produção de mudas florestais surgiu como alternativa sustentável, melhorando a qualidade dos substratos, reduzindo custos e fortalecendo iniciativas de restauração ecológica. A gestão ambiental mostrou-se fundamental na organização dessas práticas, garantindo o uso racional dos recursos e a viabilidade dos sistemas produtivos.

No âmbito fitossanitário, foram apresentadas alternativas ao uso de insumos químicos, como os óleos essenciais no controle de doenças pós-

colheita, enquanto, na aquicultura, destacaram-se estratégias de biossegurança, vacinação e sistemas como o Bioflocos, que contribuíram para a qualidade da água e a sanidade dos cultivos. A análise da qualidade da água evidenciou a necessidade de monitoramento contínuo e gestão adequada dos recursos hídricos, diante de indícios de alterações em parâmetros importantes. Nesse contexto, a gestão ambiental desempenhou papel central na prevenção de riscos, no controle de impactos e na promoção da saúde ambiental.

A gestão de resíduos sólidos urbanos também foi abordada, destacando seus elevados custos e a necessidade de padronização contratual, ao mesmo tempo em que práticas como coleta seletiva e compostagem foram apontadas como caminhos para maior eficiência e sustentabilidade. A gestão ambiental, nesse cenário, foi determinante para a implantação de políticas públicas eficazes, a redução de impactos ambientais e a promoção da economia circular.

Finalizando, a obra reforçou o papel da educação inclusiva e da agroecologia como instrumentos transformadores, capazes de promover consciência ambiental, formação crítica e maior participação social. De forma integrada, os estudos demonstraram que sustentabilidade, produtividade e equidade social puderam caminhar juntas. A valorização dos saberes locais, aliada à inovação tecnológica, às políticas públicas e à educação ambiental, evidenciou que a gestão ambiental foi fundamental para transformar o conhecimento em ação, contribuindo para enfrentar os desafios contemporâneos e construir um futuro mais justo, resiliente e sustentável.

Professor Maurício Novaes Souza

Guarapari, maio de 2025.



www.meridapublishers.com