


**PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS DE MANEJO DO SOLO NO SÉCULO XXI: REVISÃO
SISTEMÁTICA DE EVIDÊNCIAS SOBRE QUALIDADE DO SOLO (2000–2023)**

**SUSTAINABLE SOIL MANAGEMENT PRACTICES IN THE 21ST CENTURY:
SYSTEMATIC REVIEW OF EVIDENCE ON SOIL QUALITY (2000–2023)**

**PRÁCTICAS SOSTENIBLES DE MANEJO DEL SUELO EN EL SIGLO XXI: REVISIÓN
SISTEMÁTICA DE EVIDENCIAS SOBRE LA CALIDAD DEL SUELO (2000–2023)**

 <https://doi.org/10.56238/arev7n8-006>

Data de submissão: 05/07/2025

Data de publicação: 05/08/2025

Caroline Gasparin Bock Varela

Acadêmica de Licenciatura em Ciências Biológicas

Instituição: Universidade Federal da Fronteira Sul

E-mail: carolinebockvarela@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-9056-9365>

Raul Távora

Doutorando em Tecnologia e Gestão da Inovação

Instituição: Universidade Comunitária da Região de Chapecó

E-mail: raul.tavora@uffs.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5864-6830>

Gilza Maria de Souza Franco

Doutora em Ecologia de Ambientes Aquáticos

Instituição: Universidade Federal da Fronteira Sul

E-mail: gilza.franco@uffs.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5023-3211>

Alexandre Carvalho de Moura

Doutor em Engenharia Ambiental

Instituição: Universidade Federal da Fronteira Sul

E-mail: alexandre.moura@uffs.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0894-2903>

Izabel Aparecida Soares

Doutora em Agronomia

Instituição: Universidade Federal da Fronteira Sul

E-mail: izabel.soares@uffs.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0004-7664>

RESUMO

A crescente degradação dos solos agrícolas, impulsionada pelo modelo convencional de produção intensificado a partir da Revolução Verde, tem motivado a busca por alternativas sustentáveis de manejo. Este estudo teve como objetivo identificar, por meio de uma revisão sistemática da literatura científica publicada entre 2000 e 2023, as principais práticas de manejo sustentável do solo e seus efeitos sobre a qualidade físico-química e biológica do solo. Foram selecionados 24 artigos nas bases

PubMed, Web of Science, Scopus e SciELO. As práticas mais recorrentes foram rotação de culturas, plantio direto e cobertura do solo com resíduos vegetais. Os resultados apontam que essas práticas promovem melhorias significativas na fertilidade do solo, na atividade microbiana, na conservação hídrica e na redução da erosão, além de favorecerem a produtividade e a sustentabilidade econômica da produção agrícola. Com base nos estudos avaliados podemos considerar que a adoção dessas práticas representa uma estratégia viável para mitigar os impactos da agricultura convencional e fortalecer a resiliência dos agroecossistemas.

Palavras-chave: Manejo do Solo. Agricultura Sustentável. Plantio Direto. Conservação do Solo.

ABSTRACT

The increasing degradation of agricultural soils, driven by the conventional production model intensified by the Green Revolution, has motivated the search for sustainable management alternatives. This study aimed to identify, through a systematic review of the scientific literature published between 2000 and 2023, the main sustainable soil management practices and their effects on soil physical, chemical, and biological quality. Twenty-four articles were selected from PubMed, Web of Science, Scopus, and SciELO databases. The most common practices were crop rotation, no-till farming, and soil cover with plant residues. The results indicate that these practices promote significant improvements in soil fertility, microbial activity, water conservation, and erosion reduction, in addition to favoring the productivity and economic sustainability of agricultural production. Based on the studies evaluated, we can conclude that the adoption of these practices represents a viable strategy to mitigate the impacts of conventional agriculture and strengthen the resilience of agroecosystems.

Keywords: Soil Management. Sustainable Agriculture. No-Till Farming. Soil Conservation.

RESUMEN

La creciente degradación de los suelos agrícolas, impulsada por el modelo de producción convencional intensificado por la Revolución Verde, ha motivado la búsqueda de alternativas de gestión sostenible. Este estudio tuvo como objetivo identificar, mediante una revisión sistemática de la literatura científica publicada entre 2000 y 2023, las principales prácticas de gestión sostenible del suelo y sus efectos en la calidad física, química y biológica del suelo. Se seleccionaron veinticuatro artículos de las bases de datos PubMed, Web of Science, Scopus y SciELO. Las prácticas más comunes fueron la rotación de cultivos, la siembra directa y la cobertura del suelo con residuos vegetales. Los resultados indican que estas prácticas promueven mejoras significativas en la fertilidad del suelo, la actividad microbiana, la conservación del agua y la reducción de la erosión, además de favorecer la productividad y la sostenibilidad económica de la producción agrícola. Con base en los estudios evaluados, podemos concluir que la adopción de estas prácticas representa una estrategia viable para mitigar los impactos de la agricultura convencional y fortalecer la resiliencia de los agroecosistemas.

Palabras clave: Gestión del Suelo. Agricultura Sostenible. Siembra Directa. Conservación del Suelo.

1 INTRODUÇÃO

Antes da intensificação da modernização agrícola, tanto o Brasil quanto diversas regiões do mundo praticavam formas de agricultura tradicional baseadas em saberes locais transmitidos entre gerações, com foco na subsistência e no equilíbrio ecológico (Vieira; Fishlow, 2017). Esse modelo, ainda presente em muitos territórios camponeses e indígenas, utilizava técnicas adaptadas às especificidades dos ecossistemas regionais, com reduzido uso de insumos externos (Altieri, 2011; Remmers, 1993).

A partir da década de 1960, com a disseminação do pacote tecnológico da Revolução Verde, consolidou-se um paradigma produtivista centrado na intensificação do uso de fertilizantes, pesticidas e sementes geneticamente uniformizadas, acompanhado de crescente mecanização. Apesar de contribuir para a ampliação da oferta de alimentos, esse modelo também provocou impactos socioambientais significativos, como a contaminação do solo e da água, a perda da biodiversidade, a exclusão de pequenos produtores e o esgotamento de recursos naturais (Pingali, 2012; Hazell, 2009).

No contexto brasileiro, a expansão da fronteira agrícola e a dependência de monoculturas altamente tecnificadas ampliaram os desafios relacionados à conservação do solo, especialmente em biomas como o Cerrado e a Mata Atlântica, onde a erosão, compactação e contaminação química têm comprometido a resiliência agroecológica dos sistemas produtivos (Embrapa, 2021; Silva et al., 2023).

O movimento ambientalista global, impulsionado por obras como "Primavera Silenciosa" (Carson, 1962), inspirou transformações na consciência ecológica e contribuiu para o surgimento de paradigmas agroecológicos e de manejo conservacionista do solo. Esses paradigmas buscam integrar a produção agrícola com práticas sustentáveis que respeitem os ciclos naturais e assegurem a fertilidade dos solos a longo prazo (Melo, 2021).

Nesse cenário, ganha destaque a agricultura sustentável, cujas práticas – como o plantio direto, a rotação de culturas, a adubação verde e o uso de controle biológico – têm se mostrado eficazes na manutenção da qualidade físico-química e biológica do solo (Debiasi et al., 2013; Fao et al., 2020; Jensen et al., 2012). Contudo, ainda há lacunas na sistematização das evidências científicas que orientem a adoção dessas práticas em diferentes contextos edafoclimáticos e socioeconômicos.

Assim, este estudo teve como objetivo identificar, por meio de uma revisão sistemática da literatura científica, as práticas de manejo sustentável do solo mais adotadas e analisar seus efeitos sobre a qualidade do solo. As perguntas norteadoras foram: (i) quais são as práticas de manejo do solo com foco em sustentabilidade mais frequentemente descritas na literatura científica? e (ii) quais são os efeitos relatados dessas práticas sobre a qualidade física, química e biológica do solo?

2 METODOLOGIA

Este estudo foi desenvolvido por meio de uma revisão sistemática da literatura, seguindo as diretrizes do protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), adaptado às ciências ambientais (Moher et al., 2009).

A busca de artigos foi realizada nas bases de dados PubMed, Web of Science, Scopus e SciELO, utilizando as palavras-chave: A estratégia de busca empregou uma combinação de descritores em inglês, articulados por operadores booleanos, conforme descrito a seguir: ("sustainable agriculture" OR "agroecology" OR "conservation agriculture" OR "sustainable soil management") AND ("soil quality" OR "soil health" OR "soil degradation") AND ("no-till" OR "plantio direto" OR "cover crops" OR "intercropping" OR "agroforestry" OR "residue management" OR "permaculture" OR "crop rotation")

Os artigos foram incluídos no estudo atendendo aos seguintes critérios:

1. Estudos publicados nos idiomas inglês, português ou espanhol;
2. Estudos que tratassem diretamente da avaliação da qualidade do solo, considerando ao menos uma das seguintes variáveis: Textura do solo, pH, presença ou ausência de matéria orgânica, disponibilidade de nutrientes e/ou ocorrência de processos de degradação como erosão;
3. Estudos que abordassem práticas relacionadas à agricultura de conservação e/ou agricultura de precisão.

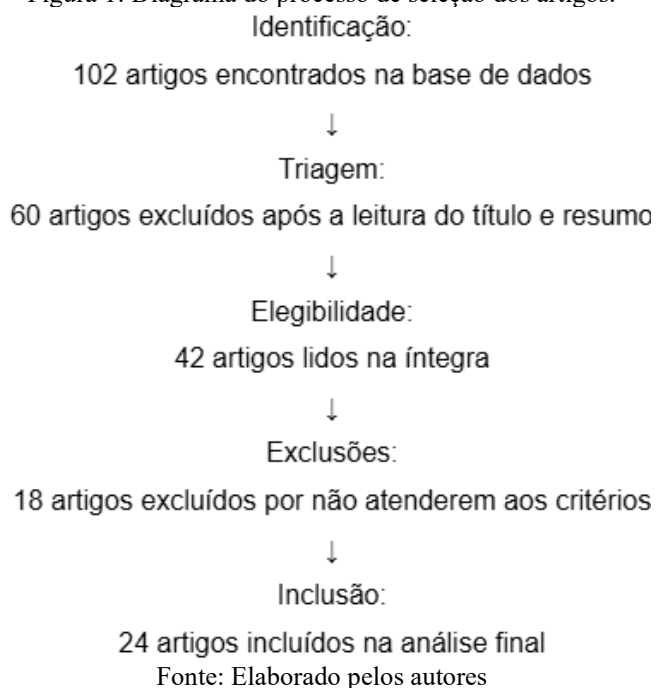
Foram excluídos:

1. Artigos de revisão;
2. Trabalhos fora do período ou idioma estabelecido;
3. Comentários, relatórios governamentais, resumos de conferências e cartas;
4. Artigos que não apresentassem dados suficientes para a avaliação da qualidade do solo, conforme os parâmetros estabelecidos.

O processo de triagem ocorreu com as seguintes etapas: inicialmente, todos os artigos identificados nas bases foram avaliados pelos títulos e resumos, sendo excluídos aqueles que não atendiam aos critérios de elegibilidade. Em seguida, os artigos potencialmente relevantes passaram por leitura completa, sendo novamente aplicados os critérios de inclusão e exclusão. Por fim, os artigos selecionados foram submetidos à extração de informações, incluindo autores, ano de publicação, tipo de manejo sustentável investigado, classificação do sistema como sustentável ou não, e a presença de práticas específicas como permacultura ou rotação de culturas.

Ao todo, foram identificados 102 artigos nas quatro bases de dados. Após a leitura de títulos e resumos, 60 estudos foram excluídos por não atenderem aos critérios de inclusão. Dos 42 artigos lidos na íntegra, 18 foram excluídos por não apresentarem dados suficientes para avaliar a qualidade do solo. Assim, 24 artigos compuseram a amostra final analisada. O fluxo do processo de seleção está representado na Figura 1.

Figura 1: Diagrama do processo de seleção dos artigos.



A organização e tabulação dos dados ocorreram por meio de planilhas do Microsoft Excel. Posteriormente, os dados coletados foram organizados em tabelas e gráficos, com apresentação das frequências absolutas e relativas das informações extraídas dos artigos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao final do processo de seleção, a análise dos 24 artigos (Tabela 1) revelou que as três práticas de manejo sustentável mais frequentes foram: rotação de culturas (70,8%), plantio direto (62,5%) e cobertura do solo com resíduos vegetais (58,3%). Essas práticas têm sido associadas, à melhoria das condições físicas, químicas e biológicas do solo, bem como ao fortalecimento da sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

Quanto ao período de publicação, observa-se um aumento no número de artigos sobre manejo sustentável do solo publicados nas bases de periódicos investigadas, principalmente a partir de 2012. Esse crescimento no número de publicações pode ser atribuído ao fortalecimento das discussões

científicas e políticas globais em torno da sustentabilidade agrícola, especialmente após o lançamento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2018), que estimularam investimentos e pesquisas voltadas à conservação dos solos e ao uso racional dos recursos (FAO *et al.*, 2015).

Tabela 1: Caracterização dos artigos incluídos na revisão sistemática.

| TÍTULO | AUTORES | ANO | REGIÃO | PRÁTICAS DE MANEJO SUSTENTÁVEL RELATADAS |
|---|------------------------|------|----------------------|--|
| Conservation Agriculture Improves Soil Quality, Crop Yield, and Incomes of Smallholder Farmers in North Western Ghana | Naab <i>et al.</i> | 2017 | Noroeste de Gana | - Plantio direto; - Retenção de resíduos de cultura de cobertura; - Rotação e consórcio de culturas (milho e soja). |
| Crop Rotation Enhances Agricultural Sustainability: From an Empirical Evaluation of Eco-Economic Benefits in Rice Production | He <i>et al.</i> | 2021 | China | - Rotação de culturas. |
| Landscape-scale analysis of cropping system effects on soil quality in a context of crop-livestock farming | Viauda <i>et al.</i> | 2018 | Alemanha e França | - Rotação de culturas. |
| Conservation agriculture systems for Malawian smallholder farmers: 1 long-term effects on crop productivity, profitability and soil quality | Ngwira <i>et al.</i> | 2012 | Malawi | Agricultura de Conservação: - Plantio direto; - Retenção de resíduos como cobertura; - Rotação de culturas/consórcio com leguminosas. |
| Sustainable landscape, soil and crop management practices enhance biodiversity and yield in conventional cereal systems | Redlich <i>et al.</i> | 2021 | Sul da Alemanha | - Plantio direto; - Rotação de culturas; - Adição de matéria orgânica ao solo. |
| Long-term productivity and environmental effects of arable farming as affected by crop rotation, soil tillage intensity and strategy of pesticide use: A case-study of two long-term field experiments in Germany and Denmark | Deike <i>et al.</i> | 2008 | Alemanha e Dinamarca | - Rotação de culturas; - Plantio direto; - Redução de pesticidas. |
| Long-term consequences of tillage, residue management, and crop rotation on selected soil micro-flora groups in the subtropical highlands | Govaerts <i>et al.</i> | 2008 | México | - Plantio direto; - Retenção e remoção de resíduos de culturas; - Rotação de culturas com milho e trigo. |
| Impacts of agricultural land use changes on pesticide use in French agriculture | Urruty <i>et al.</i> | 2016 | França | - Conversão de pastagens; - Rotação de culturas. |
| Effects of crop rotation, crop type and tillage on soil organic carbon in a semiarid climate | Shrestha <i>et al.</i> | 2013 | Canadá | - Mínimo revolvimento; - Plantio direto. |
| Impact of ecological and conventional arable management systems on chemical and biological soil quality indices in Nicaragua | Castillo <i>et al.</i> | 2001 | Norte da Nicarágua | Manejo ecológico: - Uso de compostagem; - Retenção de resíduos; - Plantio de culturas de cobertura. |
| Reconciling Pesticide Reduction with Economic and Environmental Sustainability in Arable Farming | Lechenet <i>et al.</i> | 2014 | França | - Manejo Integrado de Pragas; - Mudança no uso de pesticidas e fertilizantes; - Orgânico: sem uso de pesticidas. |
| Conservation Agriculture in mixed crop-livestock systems: Scoping crop residue trade-offs in Sub-Saharan Africa and South Asia | Valbuena <i>et al.</i> | 2012 | África e Sul da Ásia | Agricultura de Conservação: - Práticas de cobertura do solo; - Mínima perturbação do solo; - Rotações de culturas com leguminosas. |

| | | | | |
|--|---------------------------|------|--|---|
| Maize-grain legume intercropping for enhanced resource use efficiency and crop productivity in the Guinea savanna of northern Ghana | Kermah <i>et al.</i> | 2017 | Norte de Gana | - Consórcio de culturas. |
| Evaluation of long-term conservation agriculture and crop intensification in rice-wheat rotation of Indo-Gangetic Plains of South Asia: Carbon dynamics and productivity | Samal <i>et al.</i> | 2017 | Sul da Ásia e Índia | Agricultura de Conservação: - Plantio direto; - Retenção de resíduos de culturas; - Rotações de culturas. |
| Effects of conservation agriculture techniques on infiltration and soil water content in Zambia and Zimbabwe | Thierfelder e Wall | 2009 | Zâmbia | Agricultura de Conservação: - Plantio direto; - Retenção de resíduos no solo; - Consórcios de culturas. |
| Benefits and challenges of crop rotations in maize-based conservation agriculture (CA) cropping systems of southern Africa. | Thierfelder <i>et al.</i> | 2013 | Malawi, Zâmbia, Zimbabwe e Moçambique. | Agricultura de conservação, incluindo: - Plantio direto; - Retenção de resíduos na superfície do solo; - Rotações de culturas (com e sem leguminosas). |
| Conservation agriculture-related practices contribute to maize (<i>Zea mays</i> L.) yield and soil improvement in Central Malawi | Nyirenda e Balaka | 2021 | Região central do Malawi | Práticas de agricultura de conservação incluindo: - Plantio direto; - Retenção de resíduos; - Consórcios de milho com amendoim. |
| Investigating Conservation Agriculture (CA) Systems in Zambia and Zimbabwe to Mitigate Future Effects of Climate Change. | Thierfelder e Wall | 2010 | Zâmbia e Zimbábue | Agricultura de Conservação, incluindo: - Plantio direto; - Retenção de resíduos; - Rotação de culturas. |
| Effects of conservation agriculture on soil quality and productivity in contrasting agro-ecological environments of Zimbabwe | Thierfelder e Wall | 2012 | Zimbábue | Agricultura de Conservação, incluindo: - Plantio direto; - Retenção de resíduos; - Rotação de culturas. |
| A Comparative Analysis of Conservation Agriculture Systems: Benefits and Challenges of Rotations and Intercropping in Zimbabwe | Thierfelder <i>et al.</i> | 2012 | Zimbábue | Agricultura de Conservação, incluindo: - Plantio direto; - Retenção de resíduos agrícolas; - Rotação de culturas com leguminosas; - Consórcio de culturas. |
| Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo | d'Andréa <i>et al.</i> | 2004 | Morrinho, Goiás, Brasil. | Comparação entre diferentes sistemas de manejo: - Cerrado nativo (controle). - Pastagem de <i>Brachiaria sp</i> ; - Plantio direto irrigado com rotação milho-feijão; - Plantio direto irrigado com rotação milho-feijão e arroz-tomate; - Plantio convencional de longa duração; - Plantio convencional recente após pastagem. |
| Evaluation of Environmental and Economic Performance of Crop Production in Relation to Crop Rotation, Catch Crops, and Tillage | Auzins <i>et al.</i> | 2023 | Letônia | - Rotação de culturas; - Cultivo de culturas de cobertura; - Diferentes práticas de preparo do solo (plantio convencional, mínimo e direto). |
| Valuation of a crop rotation with biological inhibition potential to avoid N ₂ O emissions in comparison with synthetic nitrification inhibition | Leorri <i>et al.</i> | 2023 | Pamplona, norte da Espanha | - Rotação de culturas e uso de inibidores sintéticos de nitrificação. |

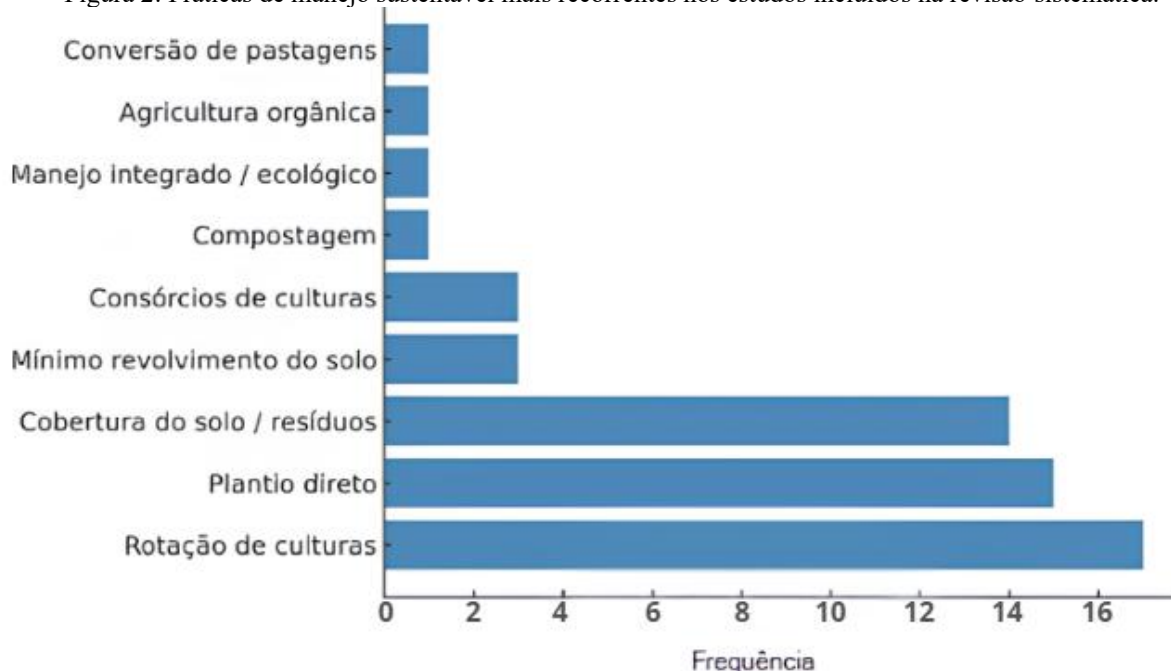
| | | | | |
|--|--------------------|------|----------------|---|
| Adubação nitrogenada do milho em dois sistemas de rotação de culturas sob plantio direto | Lana <i>et al.</i> | 2013 | Paraná, Brasil | - Plantio direto; - Rotação de culturas; - Adubação nitrogenada fracionada. |
|--|--------------------|------|----------------|---|

Fonte: Elaborada pelos autores (2025)

Destaca-se a predominância da rotação de culturas (n=17), seguida pelo plantio direto (n=15) e pela cobertura do solo ou retenção de resíduos vegetais (n=14). Práticas como mínimo revolvimento do solo e consórcios de culturas aparecem com menor frequência (n=3 cada), enquanto compostagem, manejo integrado/ecológico, agricultura orgânica e conversão de pastagens foram citadas em apenas um estudo cada (Figura 2). Ressalta-se que a maioria dos estudos analisados adotou mais de uma prática de manejo em combinação.

Nos estudos analisados, observou-se que as práticas de manejo do solo costumam ser adotadas de forma combinada, sendo a rotação de culturas a mais frequente entre elas. Essa técnica tem se mostrado eficaz na melhoria da estrutura e fertilidade do solo, além de contribuir para o controle de pragas e doenças, conforme apontado por Gonçalves *et al.* (2007), Jat *et al.* (2018) e FAO *et al.* (2020). Ao alternar diferentes espécies vegetais, especialmente aquelas com sistemas radiculares variados, a rotação favorece a infiltração de água, amplia a diversidade microbiana e auxilia na interrupção dos ciclos de patógenos, benefícios que são potencializados quando essa prática é associada ao plantio direto. Destaca-se ainda o uso de leguminosas nas rotações, por sua capacidade de fixar nitrogênio biologicamente, contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa e promover a melhoria geral da qualidade do solo (Jensen *et al.*, 2012; Jeuffroy *et al.*, 2013; Kanatas, 2020; Rodriguez *et al.*, 2020).

Figura 2: Práticas de manejo sustentável mais recorrentes nos estudos incluídos na revisão sistemática.



Elaborado pelos autores (2025).

Fonte:

O Sistema de Plantio Direto (SPD) foi o segundo mais citado nos estudos. Seu uso é amplamente difundido, sobretudo no Brasil, por minimizar o revolvimento do solo, preservar a palhada e reduzir os impactos da erosão (Reginatto, 2023). O SPD surgiu na década de 1970 como resposta à degradação provocada pelo preparo convencional e consolidou-se por seus benefícios à conservação do solo, aumento da matéria orgânica e melhoria da qualidade física, química e biológica do solo (Debiasi *et al.*, 2013; Andrade *et al.*, 2010; Casão Junior *et al.*, 2012; Carvalho *et al.*, 2009; Matoso *et al.*, 2012).

A cobertura do solo, prática tradicional resgatada pela agricultura moderna, destaca-se como fundamental na sustentabilidade agrícola ao proteger o solo com resíduos vegetais ou plantas vivas (Calegari *et al.*, 2009). Seus benefícios incluem o aumento da matéria orgânica, intensificação da atividade microbiana, regulação térmica e hídrica do solo, redução da pressão de pragas e doenças, e maior eficiência no uso de nutrientes (Tiemann *et al.*, 2015; Scherr *et al.*, 2008; FAO *et al.*, 2020). Ademais, essa prática favorece maior produtividade e estabilidade das culturas, reduzindo a necessidade de fertilizantes e pesticidas (Gaudin *et al.*, 2015; Bowles *et al.*, 2020; Smith *et al.*, 2008).

A análise das referências selecionadas demonstra que a adoção de práticas de manejo sustentável está diretamente relacionada à melhoria da qualidade do solo, ao aumento da produtividade agrícola e à sustentabilidade econômica dos sistemas produtivos. Entre as estratégias mais promissoras, destacam-se o plantio direto, a rotação de culturas, o consórcio de culturas e o uso de resíduos agrícolas, cujos efeitos positivos foram comprovados em diferentes contextos regionais e

socioeconômicos. A seguir, são sintetizados os principais resultados e desafios associados a essas práticas, com base nos estudos analisados.

3.1 AGRICULTURA DE CONSERVAÇÃO

A Agricultura de Conservação (AC) se destaca como uma das melhores práticas para melhorar a qualidade do solo e aumentar a produtividade agrícola. A AC envolve três principais princípios: o plantio direto, a retenção de resíduos como cobertura do solo e a rotação de culturas. A prática de plantio direto tem sido associada à manutenção de uma maior quantidade de carbono orgânico no solo, o que melhora sua fertilidade e estrutura, além de contribuir para a redução da erosão e da compactação (Debiasi *et al.*, 2013).

No estudo conduzido por Naab *et al.* (2017), em Gana, observou-se que a adoção do plantio direto em combinação com a rotação de culturas (especialmente milho e soja) promoveu o aumento dos teores de carbono orgânico e nitrogênio total no solo, em comparação ao sistema de preparo convencional, após quatro anos de experimento. Embora a densidade do solo tenha sido ligeiramente maior sob o plantio direto, possivelmente em razão da ausência de revolvimento mecânico, os benefícios agronômicos e econômicos desse sistema se mostraram expressivos.

Segundo os autores, os custos de produção sob plantio direto foram entre 20% e 29% menores, proporcionando maior retorno sobre o trabalho em comparação às práticas convencionais. Esses resultados reforçam o potencial do plantio direto como uma estratégia sustentável que alia benefícios ambientais e econômicos, especialmente no médio e longo prazo.

Complementando essa perspectiva, o estudo de Ngwira *et al.* (2012), no Malawi, revelou que a AC também favorece a infiltração de água no solo, um fator essencial em regiões sujeitas a déficits hídricos. Em Lemu, sistemas conservacionistas como a monocultura (CAM) e o consórcio de milho com leguminosas (CAML) apresentaram incrementos produtivos expressivos, chegando a 2,7 Mg/ha a mais de milho em relação aos sistemas convencionais, sobretudo em anos mais secos como 2009/2010. Esses sistemas também demonstraram até 42% mais infiltração de água, indicando maior eficiência hídrica.

Samal *et al.* (2017), no sul da Ásia, comparou quatro sistemas agrícolas com diferentes níveis de conservação do solo. A agricultura de conservação foi a que obteve os melhores resultados agronômicos e ambientais, com acúmulo de 47,71 Mg C ha⁻¹ de carbono orgânico total no solo, valor 14,57% superior ao sistema convencional. O aumento da atividade microbiana e enzimática também refletiu avanços relevantes na saúde do solo.

Já no distrito de Salima, região central do Malawi, Nyirenda e Balaka (2021) avaliaram mais a fundo os efeitos das práticas de agricultura de conservação sobre a produtividade e a qualidade do solo. Os resultados indicaram que os sistemas conservacionistas proporcionaram rendimentos significativamente superiores de milho (variando entre 3,98 e 4,43 Mg ha⁻¹) em comparação ao manejo convencional (1,84 Mg ha⁻¹). Além disso, observaram-se melhorias expressivas nos atributos químicos e físicos do solo, como o aumento do carbono orgânico, da matéria orgânica, do pH e do teor de nitrogênio, além da redução da densidade aparente nos sistemas com cobertura de resíduos e consórcio.

A análise de Valbuena *et al.* (2012), abrangendo diversos países da África Subsaariana e do Sul da Ásia, evidenciou o potencial da AC em sistemas agrícolas intensificados. A cobertura morta com resíduos vegetais proporcionou melhorias expressivas nas propriedades do solo em áreas com alta densidade de biomassa, enquanto a rotação com leguminosas contribuiu para o incremento da fertilidade. No entanto, em regiões de baixa produção de biomassa, a competição pelos resíduos utilizados como ração, combustível ou material de construção, dificultou a adoção dessas práticas.

Assim, os autores destacam que a viabilidade da cobertura morta está diretamente relacionada ao grau de intensificação produtiva e ao acesso a tecnologias que aumentem a disponibilidade de biomassa, reforçando a influência do contexto socioeconômico na implementação bem-sucedida da agricultura de conservação.

3.2 ROTAÇÃO DE CULTURAS: MELHORANDO A FERTILIDADE DO SOLO E A EFICIÊNCIA NO USO DE NUTRIENTES

A rotação de culturas é uma prática agrícola fundamental que promove múltiplos benefícios agronômicos e ambientais. Consiste na alternância planejada de diferentes espécies vegetais ao longo do tempo em uma mesma área, o que contribui para a manutenção da fertilidade do solo, a interrupção dos ciclos de pragas e doenças, o aumento da diversidade biológica e o uso mais eficiente de nutrientes. Quando envolve leguminosas, a rotação ainda oferece a vantagem adicional da fixação biológica de nitrogênio, reduzindo a dependência de fertilizantes sintéticos.

O estudo realizado por He *et al.* (2021) na China, comparou diferentes sistemas de rotação com o cultivo sucessivo de arroz, mostrou que essa prática não só aumentou os teores de nutrientes essenciais no solo, como nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) mas também melhorou significativamente a qualidade do solo. Apesar dos benefícios agronômicos e econômicos, o estudo alertou para alguns desafios. A acidificação do solo foi mais acentuada nos campos alagados, especialmente no cultivo sucessivo de arroz, o que exige atenção no manejo para evitar impactos

negativos a longo prazo, destacando a necessidade de monitoramento contínuo e ajustes nas práticas de manejo para evitar esses impactos negativos a longo prazo.

No Zimbábue, Thierfelder e Wall (2012), observaram melhorias significativas nos solos cultivados com rotação entre milho e leguminosas como feijão caupi e amendoim. A prática elevou a infiltração de água, reduziu a necessidade de fertilizantes nitrogenados e promoveu aumentos nos teores de carbono orgânico do solo. Além disso, favoreceu a biodiversidade microbiana, elemento essencial para o controle biológico de pragas e doenças. Esses resultados apontam para a rotação como uma alternativa viável para combater a degradação do solo comum em sistemas de monocultura intensiva.

Na região oeste da França, Viauda *et al.* (2018) se destacou que a rotação de culturas foi o fator de maior impacto positivo sobre a qualidade do solo em paisagens agrícolas. Sistemas que incluíam pastagens temporárias obtiveram os maiores Índices de Qualidade do Solo (IQS), superando aqueles compostos apenas por culturas anuais. O estudo também mostrou que a estabilidade de agregados do solo, sobretudo quando medida após umedecimento rápido, indicador de efeitos prolongados, foi mais sensível à diversidade de manejo do que outras métricas, confirmando a eficácia da rotação na melhoria da estrutura do solo ao longo do tempo.

Corroborando com esses dados, os estudos de Shrestha *et al.* (2013) no Canadá investigaram a influência da rotação contínua de culturas sobre os estoques de carbono orgânico do solo (SOC), em comparação com sistemas que incluíam períodos de pousio. O cultivo contínuo apresentou maior acúmulo de SOC na camada superficial (0 a 7,5 cm) e maiores entradas de carbono (22,1 Mg C ha⁻¹) em relação aos sistemas com pousio (18–20 Mg C ha⁻¹). A modelagem com o software Century indicou que entradas abaixo de 2,4 Mg C ha⁻¹ por ano resultam na perda gradual de SOC, reforçando a importância de manter sistemas produtivos com alta capacidade de ciclagem de biomassa para preservar a fertilidade do solo no longo prazo.

No Brasil, o estudo de Lana *et al.* (2013) avaliou os efeitos da rotação de culturas sobre a produtividade do milho e a eficiência da adubação nitrogenada, em Marechal Cândido Rondon (PR). Os resultados indicaram um aumento de 7% na produtividade do milho em áreas com rotação, em comparação às monoculturas. O parcelamento equilibrado da adubação nitrogenada, aliado ao sistema rotacionado, promoveu melhores respostas agronômicas e econômicas, além de otimizar o aproveitamento dos nutrientes. Doses maiores de nitrogênio na semeadura também elevaram significativamente a massa de grãos, a altura das plantas e o tamanho das espigas, mostrando o efeito sinérgico entre o manejo da fertilização e a diversificação de culturas.

A rotação de culturas também influencia processos biogeoquímicos e as emissões de gases de efeito estufa. Em Pamplona, no norte da Espanha, Leorri *et al.* (2023) investigaram os efeitos da rotação sorgo-trigo sobre a microbiota do solo e as emissões de óxido nitroso (N₂O). A rotação reduziu em 22% a população de bactérias oxidantes de amônia (AOB), implicando menor potencial de nitrificação. Entretanto, observou-se um aumento de 77% nas emissões acumuladas de N₂O, provavelmente devido à intensificação da desnitrificação heterotrófica. O uso do inibidor DMPP demonstrou ser uma estratégia eficaz para mitigar essas emissões sem prejudicar o rendimento do trigo, embora tenha sido detectada maior competição por nitrogênio quando o trigo sucedeu o sorgo. Isso evidencia a necessidade de um planejamento criterioso na sequência das culturas e no manejo da adubação.

Por fim, o estudo de Deike *et al.* (2008), que comparou sistemas de cultivo na Alemanha e Dinamarca, mostrou que as rotações de culturas aumentaram significativamente a produtividade e a eficiência energética em relação ao monocultivo de trigo. Além disso, apresentaram balanço positivo de húmus, com maior capacidade de reposição de matéria orgânica no solo. A melhor retenção de nitrogênio nos sistemas rotacionados também resultou em menores excedentes e risco de contaminação ambiental. Práticas complementares, como o preparo reduzido do solo e a aplicação controlada de pesticidas (com 50% de redução), reforçaram o caráter sustentável dos sistemas diversificados.

Essas evidências demonstram que a rotação de culturas não apenas sustenta a produtividade agrícola e a fertilidade do solo, mas também contribui para a segurança dos agroecossistemas frente aos desafios ambientais e climáticos, especialmente quando combinada com outras práticas conservacionistas.

3.3 CONSÓRCIO DE CULTURAS (INTERCROPPING): AUMENTANDO A EFICIÊNCIA NO USO DE RECURSOS

O consórcio de culturas, prática que consiste no cultivo simultâneo de duas ou mais culturas em um mesmo espaço, tem se destacado como uma estratégia eficaz para otimizar o uso de recursos naturais, como água, luz e nutrientes. Essa abordagem aproveita as interações benéficas entre as culturas, promovendo maior sustentabilidade e produtividade agrícola.

Kermah *et al.* (2017), em um estudo conduzido na Guiné, demonstraram que o consórcio de milho com leguminosas aumentou significativamente a eficiência no uso de nutrientes e da água. Enquanto o milho apresenta elevada demanda nutricional, especialmente por nitrogênio, as leguminosas contribuem para o enriquecimento do solo ao fixarem nitrogênio atmosférico, reduzindo

a necessidade de adubação nitrogenada externa. Essa sinergia entre as espécies resultou em ganhos substanciais tanto na produtividade quanto na qualidade do solo.

Os resultados do estudo indicaram que a produtividade total de grãos foi superior no consórcio em relação ao cultivo exclusivo de milho. O índice de uso eficiente da terra (LER) também foi mais elevado, evidenciando maior rendimento por unidade de área no sistema consorciado. Além disso, observou-se um aumento nos teores de carbono orgânico e matéria orgânica do solo, promovendo melhorias na estrutura, fertilidade e capacidade de retenção hídrica.

Também desempenhou papel importante, contribuindo para o aumento do carbono orgânico e da matéria orgânica no solo, o que favorece sua estrutura, fertilidade e capacidade de retenção de água.

Outro benefício relevante foi a diversificação das fontes de renda dos agricultores, o que fortalece a segurança alimentar e a estabilidade econômica, especialmente em regiões mais vulneráveis. O consórcio de culturas também contribuiu para a redução da degradação do solo, minimizando problemas como exaustão de nutrientes e compactação, típicos de sistemas baseados em monoculturas intensivas.

No entanto, apesar das vantagens agronômicas e ambientais, a adoção dessa prática ainda enfrenta desafios. Fatores econômicos, como a escassez de sementes de leguminosas no mercado local, e a preferência dos agricultores pelo monocultivo, são barreiras importantes. A ausência de mercados consolidados para a comercialização das leguminosas em algumas regiões também dificulta a expansão dessa estratégia.

Para que o consórcio de culturas se torne uma alternativa viável em larga escala, é essencial investir em programas de capacitação técnica, políticas públicas de incentivo, e ampliar o acesso a insumos e canais de comercialização. Essas ações são fundamentais para assegurar a sustentabilidade econômica e ambiental dessa prática, promovendo uma agricultura mais diversificada, resiliente e eficiente no uso dos recursos naturais.

3.4 MANEJO INTEGRADO E REDUÇÃO DO USO DE PESTICIDAS: RUMO A UMA AGRICULTURA SUSTENTÁVEL

A adoção de práticas que reduzam o uso de pesticidas e promovam a diversificação de culturas é fundamental para garantir a sustentabilidade ambiental dos sistemas agrícolas. Nesse contexto, o manejo integrado desponta como uma estratégia eficaz para equilibrar produtividade, conservação ambiental e viabilidade econômica.

O estudo de Lechenet *et al.* (2014) na França destacou que os sistemas de manejo integrado, que combinam a rotação de culturas, a redução do uso de pesticidas e a introdução de culturas com

baixo uso de pesticidas, apresentam menor impacto ambiental, especialmente na contaminação do solo, da água e do ar.

Além da menor dependência de insumos químicos, como fertilizantes e pesticidas, os sistemas integrados conseguiram manter níveis de produtividade semelhantes aos modelos convencionais, porém com menores custos e impactos ambientais. A diversificação de culturas, segundo Urruty *et al.* (2016), também contribuiu para aumentar a eficiência energética e reduzir a necessidade de fertilizantes nitrogenados, reforçando os benefícios agronômicos e ambientais dessa abordagem.

Redlich *et al.* (2021) em um estudo conduzido na Alemanha demonstrou que práticas como o plantio direto (No-Till) e a adubação orgânica aumentaram significativamente a densidade de predadores de solo, como aranhas e carabídeos, em 32% e 49%, respectivamente. Esses organismos são fundamentais no controle biológico de pragas, pois se alimentam de insetos herbívoros e outras pragas agrícolas. A presença desses predadores foi maior em sistemas com menor uso de agroquímicos, destacando como o manejo integrado, com ênfase na conservação da fauna útil e na redução da aplicação de pesticidas, contribui para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Além disso, esses manejos resultaram em melhor qualidade das sementes (peso de mil grãos – TKW), sem comprometer a produtividade.

Em conjunto, essas evidências apontam que o manejo integrado, aliado à diversificação e à escolha criteriosa das culturas, representa uma estratégia viável e promissora para a transição rumo a sistemas agrícolas mais sustentáveis. A redução do uso de pesticidas, a valorização da biodiversidade funcional e a menor dependência de insumos químicos são pilares centrais de uma agricultura que busca conciliar produtividade com responsabilidade ambiental e social.

3.5 MANEJO DE RESÍDUOS E PLANTIO DIRETO: PROTEGENDO O SOLO E AUMENTANDO A EFICIÊNCIA DE ÁGUA

O manejo adequado de resíduos vegetais e a adoção do plantio direto são práticas fundamentais para a conservação do solo, melhoria da atividade biológica e aumento da eficiência no uso da água nos sistemas agrícolas. Essas técnicas, especialmente quando utilizadas de forma combinada, promovem benefícios agronômicos, ambientais e produtivos significativos.

O estudo de Govaerts *et al.* (2008) realizado no México mostrou que a combinação dessas práticas melhora a atividade biológica do solo e cria um ambiente mais favorável para antagonistas naturais, reduzindo a prevalência de patógenos transmitidos pelo solo, como espécies de *Fusarium*.

A retenção de resíduos aumentou significativamente as populações de bactérias totais, *Pseudomonas fluorescentes* e Actinomicetos, tanto em sistemas de plantio direto quanto em preparo

convencional. Em contraste, o plantio direto sem retenção de resíduos apresentou as menores populações microbianas, enquanto o preparo convencional com remoção de resíduos favoreceu a dominância de fungos totais, muitos dos quais associados a doenças. Isso demonstra que a simples adoção do plantio direto, sem o manejo adequado dos resíduos, pode comprometer a atividade biológica do solo e a produtividade das culturas.

Além disso, o plantio direto associado à retenção de resíduos tem impacto positivo na agregação do solo e na estabilidade estrutural, aumentando a capacidade de retenção de nutrientes e de água. No entanto, em condições de alta umidade, alguns solos podem sofrer com encharcamento, o que pode prejudicar a produtividade, como observado por Thierfelder e Wall (2009) em experimentos conduzidos na Zâmbia e no Zimbábue. Nesses países, campos manejados com agricultura de conservação apresentaram taxas de infiltração de água entre 27% e 87% superiores às dos sistemas convencionais, no Zimbábue, esse aumento foi de 49%.

Do mesmo modo, esses sistemas reduziram significativamente a erosão (de 12,0 Mg/ha no sistema convencional para 8,0 Mg/ha no plantio direto e 6,9 Mg/ha em consórcios de milho com leguminosas). A cobertura de resíduos ajudou a minimizar a evaporação, mantendo níveis de umidade mais elevados ao longo da estação de cultivo, o que aumentou a disponibilidade hídrica para as plantas.

Na Letônia, Auzins *et al.* (2023) investigou os efeitos de diferentes sistemas agrícolas sobre a eficiência no uso do nitrogênio (NUE) e a sustentabilidade produtiva. O estudo revelou que práticas conservacionistas como o plantio direto e o preparo restrito do solo resultaram em maior eficiência do uso do nutriente a longo prazo, além de redução nos custos operacionais e no consumo de diesel. O uso adequado de culturas de cobertura foi capaz de aumentar a NUE em até 9%, enquanto a inclusão de leguminosas na rotação contribuiu para a fixação biológica de nitrogênio, ampliando a sustentabilidade do sistema. Os sistemas mais diversificados, por sua vez, apresentaram melhor rentabilidade e menor impacto ambiental, ressaltando a importância da diversificação de culturas e da conservação do solo para a eficiência dos insumos e a viabilidade econômica.

No sul da África, Thierfelder *et al.* (2013) observou que, em sistemas com plantio direto junto a rotação de culturas (com e sem leguminosas), a infiltração de água no solo aumentou de 70% a 238%, e os campos mantiveram níveis de umidade mais elevados ao longo das estações. A presença de resíduos na superfície, associada ao mínimo revolvimento do solo, também reduziu drasticamente a erosão e aumentou a resistência frente a eventos climáticos extremos, como secas. Os autores destacaram ainda que esses sistemas promoveram a presença de macrofauna do solo, como minhocas, e aumentaram o teor de carbono orgânico, especialmente nas rotações com espécies fixadoras de nitrogênio.

D'Andréa *et al.* (2004) no estado de Goiás no Brasil, avaliou os impactos de diferentes sistemas de uso da terra sobre o estoque de carbono e nitrogênio no solo e evidenciou que o plantio convencional de longa duração reduziu os estoques de carbono em relação ao cerrado nativo até a profundidade de 20 cm. Em contrapartida, sistemas com menor revolvimento do solo, como pastagens e plantio direto, demonstraram maior potencial de retenção de carbono. O plantio direto, especialmente quando associado à rotação diversificada de culturas, apresentou capacidade superior de retenção de carbono, mostrando-se uma alternativa mais sustentável.

Esses resultados reforçam que o manejo adequado de resíduos em sistemas de plantio direto não apenas melhora a saúde e a atividade biológica do solo, ao fortalecer a atividade biológica, reduzir a erosão e aumentar a eficiência hídrica, essas práticas contribuem para a resiliência dos cultivos diante de estresses bióticos e abióticos, sendo essenciais para a agricultura do futuro.

3.6 PRÁTICAS ECOLÓGICAS E BIOLÓGICAS: COMPOSTAGEM, RESÍDUOS E CULTURAS DE COBERTURA NA SUSTENTABILIDADE DO SOLO

Estudos realizados em diferentes regiões do mundo demonstram como práticas de manejo ecológico podem contribuir para a melhoria da qualidade do solo, promovendo sistemas agrícolas mais sustentáveis.

Na região do Pacífico norte da Nicarágua, Castillo *et al.* (2001) avaliou diferentes formas de manejo em 25 locais agrícolas nos condados de Chinandega e León. Os resultados demonstraram que o manejo ecológico promoveu melhorias significativas nos atributos biológicos e químicos do solo. Houve maior teor de carbono microbiano (MB-C), maior biomassa microbiana e aumento na atividade enzimática (fosfatase ácida), indicadores de uma fertilidade biológica mais elevada.

O carbono orgânico do solo (SOC) foi 30% maior no manejo ecológico em comparação ao convencional, o que reflete maior acúmulo de matéria orgânica e melhor estrutura do solo. Além disso, esse sistema contribuiu para um equilíbrio mais sustentável de nutrientes, com menor acidificação e menor necessidade de intervenções químicas.

Em contraste, o manejo convencional resultou em maior depleção de nutrientes, pH mais ácido, compactação do solo e redução na qualidade do solo a longo prazo.

Esses dados reforçam que práticas ecológicas como a compostagem, a gestão adequada de resíduos vegetais e o cultivo de plantas de cobertura são estratégias eficazes para restaurar e manter a saúde do solo, reduzir a dependência de insumos químicos e garantir a resiliência dos sistemas produtivos. Ao promover maior biodiversidade no solo e melhorar suas propriedades físicas, químicas

e biológicas, essas práticas são fundamentais para a construção de uma agricultura verdadeiramente sustentável.

3.7 EFETIVIDADE E OBSTÁCULOS DAS PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS

A efetividade das técnicas de manejo sustentável varia conforme o contexto climático, regional e socioeconômico em que são aplicadas. Em regiões de clima tropical e subtropical, como grande parte do território brasileiro, o plantio direto tem se mostrado uma alternativa eficaz para reduzir perdas de solo causadas por chuvas intensas e conservar a umidade, sendo amplamente estudado por Calegari *et al.* (2009) e Casão Junior *et al.* (2012). Já em áreas semiáridas, práticas como a cobertura do solo desempenham um papel fundamental na conservação hídrica e na regulação térmica do solo (FAO *et al.*, 2020; Gonçalves *et al.*, 2007).

A rotação de culturas, por sua vez, destaca-se em diferentes cenários pela sua capacidade de recuperar nutrientes, controlar pragas naturalmente e promover biodiversidade no solo (Altieri, 2011; Gaudin *et al.*, 2015). O sucesso de cada técnica, contudo, também está relacionado às condições regionais e à escala da produção. Enquanto em propriedades de maior porte há maior viabilidade técnica e econômica para a adoção de práticas mecanizadas, como o plantio direto, em áreas com predominância da agricultura familiar destacam-se técnicas de menor custo e baseadas em conhecimentos tradicionais, como o consórcio de culturas.

Apesar das evidências dos benefícios ambientais e agronômicos, a adoção dessas práticas encontra diversos obstáculos. No campo técnico, a ausência de assistência especializada e de formação continuada limita a apropriação das práticas por parte dos agricultores, especialmente os pequenos produtores (Melo, 2021; Jensen *et al.*, 2012). Culturalmente, há uma resistência natural à mudança de hábitos consolidados ao longo de gerações (Altieri, 2011; Remmers, 1993).

Do ponto de vista econômico, muitos agricultores enfrentam dificuldades para acessar linhas de crédito ou incentivos voltados à transição agroecológica (Hazell, 2009; Pingali, 2012). Além disso, a dependência de insumos convencionais e a pressão de agentes comerciais ligados ao agronegócio ainda dificultam a adoção plena de práticas sustentáveis, tornando essencial o fortalecimento de políticas públicas e de redes de apoio técnico e institucional.

A integração dessas práticas ao cotidiano produtivo depende, portanto, não apenas da sua eficácia agronômica, mas também da superação de barreiras estruturais, culturais e informacionais que envolvem o universo rural.

4 CONCLUSÃO

Com base nas evidências apresentadas, as melhores práticas de cultivo para garantir a sustentabilidade e aumentar a produtividade são a agricultura de conservação, a rotação de culturas, o consórcio de culturas e o manejo integrado. Essas práticas não só melhoram a fertilidade do solo e aumentam os rendimentos, mas também promovem a sustentabilidade econômica, reduzindo a dependência de insumos externos e aumentando a resiliência dos sistemas agrícolas.

No entanto, é fundamental que a adoção dessas práticas seja realizada de forma contextualizada, respeitando as especificidades de cada região, bem como as capacidades econômicas, sociais e técnicas dos agricultores. Barreiras como o acesso limitado a insumos, à assistência técnica e a mercados regionais ainda representam desafios importantes à implementação ampla dessas práticas.

Diante disso, torna-se essencial o fortalecimento de políticas públicas que incentivem a transição agroecológica, associadas ao investimento em pesquisa, extensão rural e capacitação técnica. Apenas com apoio institucional e conhecimento acessível será possível consolidar modelos de produção agrícola que aliem produtividade, rentabilidade e conservação ambiental.

Portanto, a adoção de sistemas de manejo sustentáveis se apresenta como caminho promissor para garantir a conservação dos recursos naturais, a segurança alimentar e a viabilidade econômica da agricultura a longo prazo, beneficiando não apenas as gerações atuais, mas também futuras.

REFERÊNCIAS

- ALTIERI, M. A.; TOLEDO, V. M. The agroecological revolution in Latin America: rescuing nature, ensuring food sovereignty and empowering peasants. *Journal Of Peasant Studies*, [S.L.], v. 38, n. 3, p. 587-612, jul. 2011. Informa UK Limited. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/03066150.2011.582947>. Acesso em: 21 jan. 2025.
- ALTIERI, M. A. *Agroecologia: bases científicas para uma agricultura sustentável*. São Paulo: Expressão Popular, 2011.
- AMEEN, A.; RAZA, S. Green Revolution: a review. *International Journal of Advances in Scientific Research*, v.3, p.129-137, 2017. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/105038703/3011.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2025.
- ANDRADE, A. G.; FREITAS, P. L.; LANDERS, J. Aspectos gerais sobre o manejo e conservação do solo e da água e as mudanças ambientais. In: PRADO, R. B. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/859396>. Acesso em: 21 jan. 2025.
- AUZINS, A. et al. Evaluation of environmental and economic performance of crop production in relation to crop rotation, catch crops, and tillage. *Agriculture*, v. 13, n. 8, p. 1539, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture13081539>. Acesso em: 13 fev. 2025.
- BOWLES, T. M. et al. Long-Term Evidence Shows that Crop-Rotation Diversification Increases Agricultural Resilience to Adverse Growing Conditions in North America. *One Earth*, [s. l], v. 2, p. 284-293, 20 mar. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.007>. Acesso em: 20 fev. 2025.
- BOZAL-LEORRI, A. et al. Evaluation of a crop rotation with biological inhibition potential to avoid N2O emissions in comparison with synthetic nitrification inhibition. *journal of environmental sciences*, v. 127, p. 222-233, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.04.035>. Acesso em: 15 fev. 2025.
- BROWN, G. G.; COOPER, M.; KOBAYASHI, M.. Threats to soil biodiversity: global and regional trends. *State of knowledge of soil biodiversity: status, challenges and potentialities*. Tradução. Rome: FAO, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cb1928en>. Acesso em: 05 mai. 2025.
- CALEGARI, A. et al. *Adubação verde no Brasil: fundamentos e prática*. 5. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.
- CALEGARI, A.; COSTA, A. Sistemas conservacionistas de uso do solo. In: PRADO, R. B.; TURETTA, A. P. D.; ANDRADE, A. G. *Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. p.279-308
- CARVALHO, J. L. N. et al. Open-access Conversion of cerrado into agricultural land in the south-western Amazon: carbon stocks and soil fertility. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 66, p. 233-241, 31 mar. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000200013>. Acesso em: 23 mar. 2025.

CASÃO JUNIOR, R.; ARAÚJO, A. G.; LLANILLO, R. F. Plantio direto no Sul do Brasil: fatores que facilitaram a evolução do sistema e o desenvolvimento da mecanização conservacionista. Londrina: IAPAR, 2012. Disponível em: <https://biblioteca.incaper.es.gov.br/busca?b=ad&id=179&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22LLANILLO,%20R.%20F.%22&qFacets=autoria:%22LLANILLO,%20R.%20F.%22&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1>. Acesso em: 20 fev. 2025.

CASÃO JUNIOR, R.; FORTE, L. H.; CARVALHO, L. M. T. Sistema de plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste. 2012.

CASTILLO, X. et al. Impact of ecological and conventional arable management systems on chemical and biological soil quality indices in Nicaragua. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 33, n. 12-13, p. 1591-1597, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00089-X). Acesso em: 07 fev. 2025.

D'ANDRÉA, A. F. et al. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v. 39, p. 179-186, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000200012>. Acesso em: 01 fev. 2025.

DEBIASI, H. et al. Sistemas de preparo do solo: trinta anos de pesquisas na Embrapa Soja. Embrapa, Londrina, p. 12-64, jun. 2013. Disponível em: <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-infoteca-e-doc-970601/Description>. Acesso em: 20 jan. 2025.

DEIKE, S. et al. Long-term productivity and environmental effects of arable farming as affected by crop rotation, soil tillage intensity and strategy of pesticide use: A case-study of two long-term field experiments in Germany and Denmark. *European Journal of Agronomy*, v. 29, n. 4, p. 191-199, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.06.001>. Acesso em: 02 Fev. 2025.

FAO; IFAD; UNICEF; WFP; WHO. The State of Food Security and Nutrition in the World 2020. Transforming food systems for affordable healthy diets. Rome: FAO, 2020. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/9a0fca06-5c5b-4bd5-89eb-5dbec0f27274/content>. Acesso em: 05 mai. 2025.

GAUDIN, A. C. M. et al. Wheat improves nitrogen use efficiency of maize and soybean-based cropping systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v.210, n.1, p.1-10, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.04.034>. Acesso em: 13 fev. 2025.

GONÇALVES, M. C. et al. Conservação da umidade do solo em função de diferentes sistemas de cobertura em pomar de goiabeira. *Revista Brasileira de Fruticultura*, Jaboticabal, v. 29, n. 2, p. 355–360, 2007.

GONÇALVES, S. L. et al. Rotação de culturas. Embrapa, Londrina, p. 1-8, set. 2007. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/15429863.pdf>. Acesso em: 10 maio 2025.

GOVAERTS, B. et al. Long-term consequences of tillage, residue management, and crop rotation on selected soil micro-flora groups in the subtropical highlands. *Applied Soil Ecology*, v. 38, n. 3, p. 197-210, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.10.009>. Acesso em: 17 fev 2025.

HAZELL, P. B. A revolução verde asiática. Instituto Internacional de Pesquisa em Políticas Alimentares (IFPRI). Washington, DC, 2009. Disponível em: <https://www.ifpri.org/publication/asian-green-revolution>. Acesso em: 16 mar. 2025.

HE, D. C. et al. Crop rotation enhances agricultural sustainability: from an empirical evaluation of eco-economic benefits in rice production. *Agriculture*, v. 11, n. 2, p. 91, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/11/2/91>. Acesso em: 10 fev. 2025.

JAT. L. M. et al. Chapter Four - Soil Processes and Wheat Cropping Under Emerging Climate Change Scenarios in South Asia. *Advances in Agronomy*, v.148, p.111-171, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.11.006>. Acesso em: 12 fev. 2025.

JENSEN, E. S. et al. Legumes for mitigation of climate change and the provision of feedstock for biofuels and biorefineries: a review. *Agronomy For Sustainable Development*, [s. l], v. 32, p. 329-364, 19 out. 2011. Disponível em: https://idp.springer.com/authorize/casa?redirect_uri=https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-011-0056-7&casa_token=oSWNjvq5d7IAAAAA:eoorgOeZwA5C1CpPIV9GfG9lcBcDpx_aks5aiqKxZw7wQiYjJ8r1qvqxjqRnC9_B__0qI3JtSUxbk6MXg. Acesso em: 7 fev. 2025.

JEUFFROY, M. H. et al. Nitrous oxide emissions from crop rotations including wheat, oilseed rape and dry peas. *Biogeosciences*, v.10, n.3, p.1787-1797, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/bg-10-1787-2013>. Acesso em: 12 mar. 2025.

JEUFFROY, M. H. et al. Agroecology and Organic farming: between innovation and politicization. *Cahiers Agricultures*, v. 22, n. 6, p. 517-523, 2013.

KANATAS, P. Mini-review: the role of crop rotation, intercropping, sowing dates and increased crop density towards a sustainable crop and weed management in arable crops. *Agraarteadus*, v.31. n.1, p.22-27, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.15159/jas.20>. Acesso em: 12 fev. 2025.

KERMAH, M. et al. Maize-grain legume intercropping for enhanced resource use efficiency and crop productivity in the Guinea savanna of northern Ghana. *Field crops research*, v. 213, p. 38-50, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.07.008>. Acesso em: 03 fev. 2025.

LANA, Maria do Carmo et al. Adubação nitrogenada para o milho em dois sistemas de rotação de culturas sob plantio direto. *Ceres*, v. 60, n. 6, 2013. Disponível em: <https://ojs.ceres.ufv.br/ceres/article/view/4081> 03 fev. 2025.

LECHENET, M. et al. Reconciling pesticide reduction with economic and environmental sustainability in arable farming. *PloS one*, v. 9, n. 6, p. e97922, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097922>. Acesso em: 18 jan. 2025.

MATOSO, S. C. G et al. Frações de carbono e nitrogênio de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob diferentes usos na Amazônia brasileira. *Acta Amazônica*, v.42, n.2, p.231-240, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672012000200008>. Acesso em: 7 mai. 2025.

MELO, R. A. de. Agricultura familiar e agroecologia: desafios e estratégias para o fortalecimento das práticas sustentáveis. *Cadernos de Agroecologia*, Brasília, v. 16, n. 1, p. 1-10, 2021.

MELO, G. W. B. Manejo do solo. Embrapa, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/uva-para-processamento/producao/solo-e-adubacao/manejo-do-solo#:~:text=O%20manejo%20do%20solo%20consiste,explora%C3%A7%C3%A3o%20seja%20duradoura%2A0e%20sustent%C3%A1vel>. Acesso em: 30 mar. 2025.

MOHER, D, L. A. et al. PRISMA Group. Itens de relato preferenciais para revisões sistemáticas e meta-análises: a declaração PRISMA. Disponível em: [10.1136/bmj.b2535](https://doi.org/10.1136/bmj.b2535). Acesso em: 02 mar. 2025

NAAB, J. B. et al. Conservation agriculture improves soil quality, crop yield, and incomes of smallholder farmers in North Western Ghana. *Frontiers in plant science*, v. 8, p. 996, 2017. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2017.00996/full>. Acesso em: 15 fev. 2025.

NYIRENDA, H.; BALAKA, V. Conservation agriculture-related practices contribute to maize (*Zea mays* L.) yield and soil improvement in Central Malawi. *Heliyon*, v. 7, n. 3, 2021. Disponível em: [10.1016/j.heliyon.2021.e06636](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06636). Acesso em: 05 fev. 2025.

NGWIRA, A. R. et al. Conservation agriculture systems for Malawian smallholder farmers: long-term effects on crop productivity, profitability and soil quality. *Renewable Agriculture and Food Systems*, v. 28, n. 4, p. 350-363, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S1742170512000257>. Acesso em: 7 fev. 2025.

ONU, PNUMA. Transformando nosso mundo: A agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. *AmbientaMENTEsustentable*, v. 25, n. 1, p. 171-190, 2018.

PEREIRA, E. M. Movimentos ambientalistas no Rio Grande Do Sul (décadas 1970-80). *Oficina do Historiador*, [s. l], p. 21-42, jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.15448/2178-3748.2018.1.24308>. Acesso em: 7 abr. 2025.

PINGALI, P. L. Policies for sustainable food systems. In: CAMPANHOLA, C.; PANDEY, S. (Ed.). *Sustainable food and agriculture: an integrated approach*. Rome: FAO; London: Elsevier, 2019. p.509-521. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812134-4.00045-5>. Acesso em: 7 abr. 2025.

PINGALI, P. L. Green Revolution: impacts, limits, and the path ahead. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Washington, D.C., v. 109, n. 31, p. 12302–12308, 2012. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.0912953109>. Acesso em: 13 mai. 2025.

REDLICH, S. et al. Sustainable landscape, soil and crop management practices enhance biodiversity and yield in conventional cereal systems. *Journal of Applied Ecology*, v. 58, n. 3, p. 507-517, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.1382>. Acesso em: 12 fev. 2025.

REGINATTO, Maicon et al. Sistema plantio direto orgânico: rotações de cultura e controle mecânico de plantas espontâneas no sudoeste do Paraná. 2023. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/31889>. Acesso em: 03 jul. 2025.

REMMERS, J. J. Agroecologia e agricultura sustentável: desafios e oportunidades. Estudos Avançados, São Paulo, v. 7, n. 18, p. 195–211, 1993.

RODRÍGUEZ, C. et al. Grain legume-cereal intercropping enhances the use of soil-derived and biologically fixed nitrogen in temperate agroecosystems. A meta-analysis. European Journal Of Agronomy, v. 118, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126077>. Acesso em: 30 mar. 2025.

SAMAL, S. K. et al. Evaluation of long-term conservation agriculture and crop intensification in rice-wheat rotation of Indo-Gangetic Plains of South Asia: Carbon dynamics and productivity. European Journal of Agronomy, v. 90, p. 198-208, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.08.006>. Acesso em: 10 fev. 2025.

SCHERR, S. J.; MCNEELY, J. A. Biodiversity conservation and agricultural sustainability: towards a new paradigm of ‘ecoagriculture’ landscapes. Philosophical Transactions of The Royal Society B. Biological Sciences, v.363, n.1491, p.477-494, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2165>. Acesso em: 30 mar. 2025.

SHRESTHA, B. M. et al. Effects of crop rotation, crop type and tillage on soil organic carbon in a semiarid climate. Canadian Journal of Soil Science, v. 93, n. 1, p. 137-146, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4141/cjss2012-078>. Acesso em: 30 mar. 2025.

SMITH, R. G.; GROSS, K. L.; ROBERTSON, G. P. Effects of crop diversity on agroecosystem function: crop yield response. Ecosystems, v.11, n.3, p.355-366, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10021-008-9124-5>. Acesso em: 7 abr. 2025.

THIERFELDER, C.; WALL, P. C. Effects of conservation agriculture techniques on infiltration and soil water content in Zambia and Zimbabwe. Soil and tillage research, v. 105, n. 2, p. 217-227, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.07.007>. Acesso em: 07 fev. 2025.

THIERFELDER, C.; WALL, P. C. Investigating conservation agriculture (CA) systems in Zambia and Zimbabwe to mitigate future effects of climate change. Journal of Crop Improvement, v. 24, n. 2, p. 113-121, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15427520903558484>. Acesso em: 07 fev. 2025.

THIERFELDER, C.; WALL, P. C. Effects of conservation agriculture on soil quality and productivity in contrasting agro-ecological environments of Zimbabwe. Soil use and management, v. 28, n. 2, p. 209-220, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2012.00406.x>. Acesso em: 07 fev. 2025.

THIERFELDER, C. et al. A comparative analysis of conservation agriculture systems: Benefits and challenges of rotations and intercropping in Zimbabwe. Field crops research, v. 137, p. 237-250, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.08.017>. Acesso em: 07 fev. 2025.

THIERFELDER, C. et al. Benefits and challenges of crop rotations in maize-based conservation agriculture (CA) cropping systems of southern Africa. International Journal of Agricultural Sustainability, v. 11, n. 2, p. 108-124, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14735903.2012.703894>. Acesso em: 07 fev. 2025.

TIEMANN, L. K. et al. Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem. *Ecology letters*, v.18, n.8, p.761-771, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ele.12453>. Acesso em: 30 jan. 2025.

TURETTA, A. P. D.; ANDRADE, A. G. (org.). Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais. Rio de Janeiro: Embrapa, 2010. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/859117>. Acesso em: 20 fev. 2025.

URRUTY, N. et al. Impacts of agricultural land use changes on pesticide use in French agriculture. *European Journal of Agronomy*, v. 80, p. 113-123, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.07.004>. Acesso em: 02 fev. 2025.

VALBUENA, D. et al. Conservation agriculture in mixed crop–livestock systems: scoping crop residue trade-offs in Sub-Saharan Africa and South Asia. *Field crops research*, v. 132, p. 175-184, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.02.022>. Acesso em: 10 fev. 2025.

VIAUD, V. et al. Landscape-scale analysis of cropping system effects on soil quality in a context of crop-livestock farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 265, p. 166-177, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.06.018>. Acesso em: 11 fev. 2025.

VIEIRA FILHO, J. E. R; Fishlow, Al. Agricultura e indústria no Brasil: inovação e competitividade. 2017. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/7682>. Acesso em: 30 jun. 2025.