

METODOLOGIAS PARA MENSURAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL E ECONÔMICO DO BALANÇO DE CARBONO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

METHODOLOGIES FOR MEASURING THE ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC IMPACT OF THE CARBON BALANCE: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

Autores: Claudia de Brito Quadros Gonçalves¹; Madalena Maria Schlindwein²; Clandio Favari Ruviaro³

Filiação: UFGD – Universidade Federal da Grande Dourados¹²³

E-mail: claudia.b.quadros@gmail.com; madalenaschlindwein@ufgd.edu.br; clandioruviaro@ufgd.edu.br

Grupo de Trabalho (GT04): Questão ambiental, agroecologia e sustentabilidade

Resumo

Os sistemas agroflorestais biodiversos (SAFs) são práticas produtivas que possibilitam a diversificação de espécies agrícolas, arbórea e/ou animais, fornecendo diversos benefícios, como serviços ecossistêmicos, segurança alimentar, geração de renda, diminuição da pobreza e contribui para o desenvolvimento sustentável. Entretanto, essa prática ainda é pouco adotada, uma possibilidade de incentivar os agricultores familiares na adoção desses sistemas é o mercado de carbono. Desse modo, realizou-se este estudo com o objetivo de identificar as metodologias utilizadas para a mensuração de serviços ecossistêmicos, com enfoque no impacto do carbono, em sistemas agroflorestais e sua avaliação econômico-financeira. Para isso, foi realizado uma revisão sistemática seguindo o protocolo PRISMA. Constatou-se que a maioria dos estudos se limitou a analisar o sequestro de carbono, desconsiderando a emissão do carbono pelo manejo dos sistemas agroflorestais. Além disso, diversas barreiras impedem os agricultores em adotar ou permanecer nesses sistemas. Entretanto, os benefícios e oportunidades para agricultores e a sociedade, desse sistema, ambientalmente mais sustentável, sugerem a formulação de políticas públicas para incentivar a transição por caminhos agroecológicos, com as agroflorestas, como por exemplo, o aporte de recursos financeiro para os agricultores nos primeiros anos, escoamento seguro da produção e assistência técnica especializada.

Palavras-chave: Desenvolvimento sustentável; serviços ecossistêmicos; sistemas agroflorestais.

Abstract

Biodiverse agroforestry systems (BAFs) are productive practices that enable the diversification of agricultural, tree and/or animal species, providing various benefits such as ecosystem services, food security, income generation, poverty reduction and contributing to sustainable development. However, this practice is still not widely adopted and one way of encouraging family farmers to adopt these systems is through the carbon market. The aim of this study was to identify the methodologies used to measure ecosystem services, with a focus on carbon impact, in agroforestry systems and their economic and financial evaluation. A systematic review was carried out using the PRISMA protocol. It was found that the majority of studies were limited to analysing carbon sequestration, disregarding carbon emissions from the management of agroforestry systems. In addition, various barriers prevent farmers from adopting or remaining in these systems. However, the benefits and opportunities for farmers and society of this more environmentally sustainable system suggest the formulation of public policies to encourage the transition to agroecological paths with agroforestry, such as financial resources for farmers in the first few years, safe disposal of production and specialised technical assistance.

Key words: Sustainable development; ecosystem services; agroforestry systems.

1. Introdução

No contexto atual, a sustentabilidade ambiental e econômica no setor agropecuário tem repercutido em desafios para conciliar o desenvolvimento econômico brasileiro, com o aumento da produção com menor impacto para o meio ambiente (IPEA, 2021; Silva et al., 2022). O setor agropecuário destaca-se pelo desempenho na estabilidade da balança comercial no país, uma vez que o agronegócio brasileiro, constituído pelo setor agropecuário e a indústria que atua no processo produtivo, respondeu por 24,4% do PIB do país em 2023 (CEPEA, 2023).

Desse modo, diversas alternativas estão sendo utilizadas para reduzir os impactos ambientais na agropecuária (Cisternas et al., 2020; Vinholis et al., 2022; Bellé, Schenatto e Guadagnin, 2023). Sistemas produtivos com maior biodiversidade e sinergia, como os sistemas agroflorestais, podem ser uma opção para agricultores familiares, devido a sua integração com diferentes espécies, tanto agrícolas, quanto arbóreas. Ainda podem oportunizar diversos serviços ecossistêmicos, contribuindo com o agricultor e com a sociedade, devido seu potencial de mitigação dos efeitos das mudanças climáticas (Jalón et al., 2018; Kay et al., 2018; Jezeer et al., 2019; Kearney et al., 2019; Cerda et al., 2020).

Diversos estudos apontaram a viabilidade econômica (Martinelli et al. 2019; Hoa Do et al., 2020; Notaro et al., 2020; Cechin et al., 2021; Gonçalves, Schlindwein e Silva, 2024) e ambiental (Aryal et al., 2019; Tschora e Cherubini, 2020; Li et al., 2021; Pulina et al., 2022; Andrade, Segura e Suárez, 2023; Kurmi et al., 2024) de sistemas agroflorestais, apresentando vários benefícios deste sistema produtivo. Assim, analisar as metodologias econômicas e ambientais de uma forma integrada facilita a compreensão com uma visão abrangente como, por exemplo, avaliar o balanço de carbono e o seu impacto econômico, analisando diversas metodologias com a compreensão mais holística do sistema (Cerda et al., 2020; Gonçalves et al., 2021; Biswas et al., 2022). Ao analisar as metodologias mais eficientes e promissoras, este estudo avança ao fornecer ferramentas para pesquisadores e especialistas na análise de práticas mais sustentáveis.

Assim, esta revisão sistemática busca sintetizar o conhecimento científico apresentado na literatura, além de oportunizar *insight* com a perspectiva de proporcionar estudos futuros. Analisar aspectos ambientais e econômicos pode contribuir para a formulação e implementação de políticas públicas com o fortalecimento do desenvolvimento sustentável.

Dessa forma, realizou-se este estudo com o objetivo de descrever as metodologias utilizadas para a mensuração de serviços ecossistêmicos de carbono, em sistemas agroflorestais, e sua avaliação econômico-financeira.

Para a realização do trabalho utilizou-se a revisão sistemática de acordo com o protocolo PRISMA, analisando 92 artigos, publicados entre 2018 a 2024, esse período inicial foi selecionado pois compreende o início das tratativas sobre a regulamentação do mercado internacional de carbono na COP-24 (Silveira e Oliveira, 2021). O foco das buscas refere-se aos serviços ecossistêmicos para o armazenamento de carbono e análise econômica de sistemas agroflorestais.

O trabalho estrutura-se em cinco seções, incluindo esta introdução. Na segunda seção consta a metodologia aplicada ao estudo. A seguir, apresentam-se os resultados da pesquisa e, na sequência, as discussões sobre o tema proposto. Por fim, as considerações finais e as referências que embasaram o estudo.

2. 2. Metodologia

Uma revisão sistemática foi realizada para buscar evidências científicas sobre a temática dos sistemas agroflorestais e as metodologias para a avaliação ambiental e econômica, com foco no balanço de carbono. Desse modo, o conhecimento científico pode ser sintetizado a fim de constatar lacunas e possibilitar pesquisas futuras.

Para isso, seguiu-se o protocolo PRISMA, com métodos previamente definidos, proporcionando o rigor científico. Essa escolha ocorreu devido a credibilidade e aceitabilidade deste modelo na comunidade científica internacional (Low *et al.*, 2023).

2.1 Seleção dos artigos científicos

A revisão sistemática foi elaborada no período de abril a julho de 2023 e fevereiro a março de 2025. Para diminuir a amostra, foram estabelecidos filtros limitantes, e o período selecionado foram sete anos (2018 a 2024). A base de dados utilizada foi a Web of Science e a busca dos artigos concentrou-se em analisar as *strings* no título, resumo e palavras-chave.

Para essa busca os seguintes descritores foram utilizados: "*Agroforestry Systems*" and "*Life Cycle Costing*" or "*Agroforestry Systems*" and "*Life Cycle*" or "*Agroforestry Systems*" and "*ecosyst* service**" or "*Agroforestry Systems*" and "*climate change*" or "*Climate-smart agroforestry*" or "*Carbon credit**" and "*Agroforestry Systems*" or "*carbon market*" and "*Agroforestry Systems*" or "*Carbon sequestration*" and "*Agroforestry Systems*" or "*Certified Emission Reduction*" and "*Agroforestry Systems*" or *income* and "*agroforestry systems*" or "*agroforestry system*" and "*well-being*" or "*agroforestry system*" and "*viability economic*".

O idioma utilizado foi o inglês, uma vez que as publicações internacionais são predominantemente na língua inglesa. Após a triagem, um total de 1251 artigos integraram a amostra, desses 17 artigos duplicados foram excluídos, com o auxílio do software *StArt* (*State of the Art through Systematic Review*) desenvolvida pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software (LaPES).

Posteriormente, as editoras Elsevier e Springer Nature foram selecionadas, uma vez que elas possuem mais publicações sobre a temática analisada. Assim, resultou em uma amostra de 654 artigos. Foram excluídos 74 artigos de conferência, revisão e capítulos de livros. Para a triagem, após a leitura do título, resumo e artigo completo, foram eleitos 506 artigos e, após análise, foram excluídos 409 artigos, que não se enquadraram no escopo do estudo ou artigos não aplicados. Além disso, foram excluídos 5 artigos que apresentavam classificação inferior a Q2, no quartil da categoria JCR. Considerou-se essa escolha pela classificação no quartil Q1 e Q2 pela relevância das revistas categorizadas nessas métricas, na comunidade científica internacional com a construção de conhecimento, nessa temática analisada. Por fim, foram selecionados 92 artigos, o que representa 7,35% da amostra inicial. A triagem dos artigos foi realizada segundo critérios de inclusão e exclusão previamente estabelecidos em protocolo.

Para a análise dos dados quantitativos e qualitativos utilizou-se o *software* excel. A fim de ilustrar os critérios de seleção dos artigos foi desenvolvido o Fluxograma, conforme Figura 1:

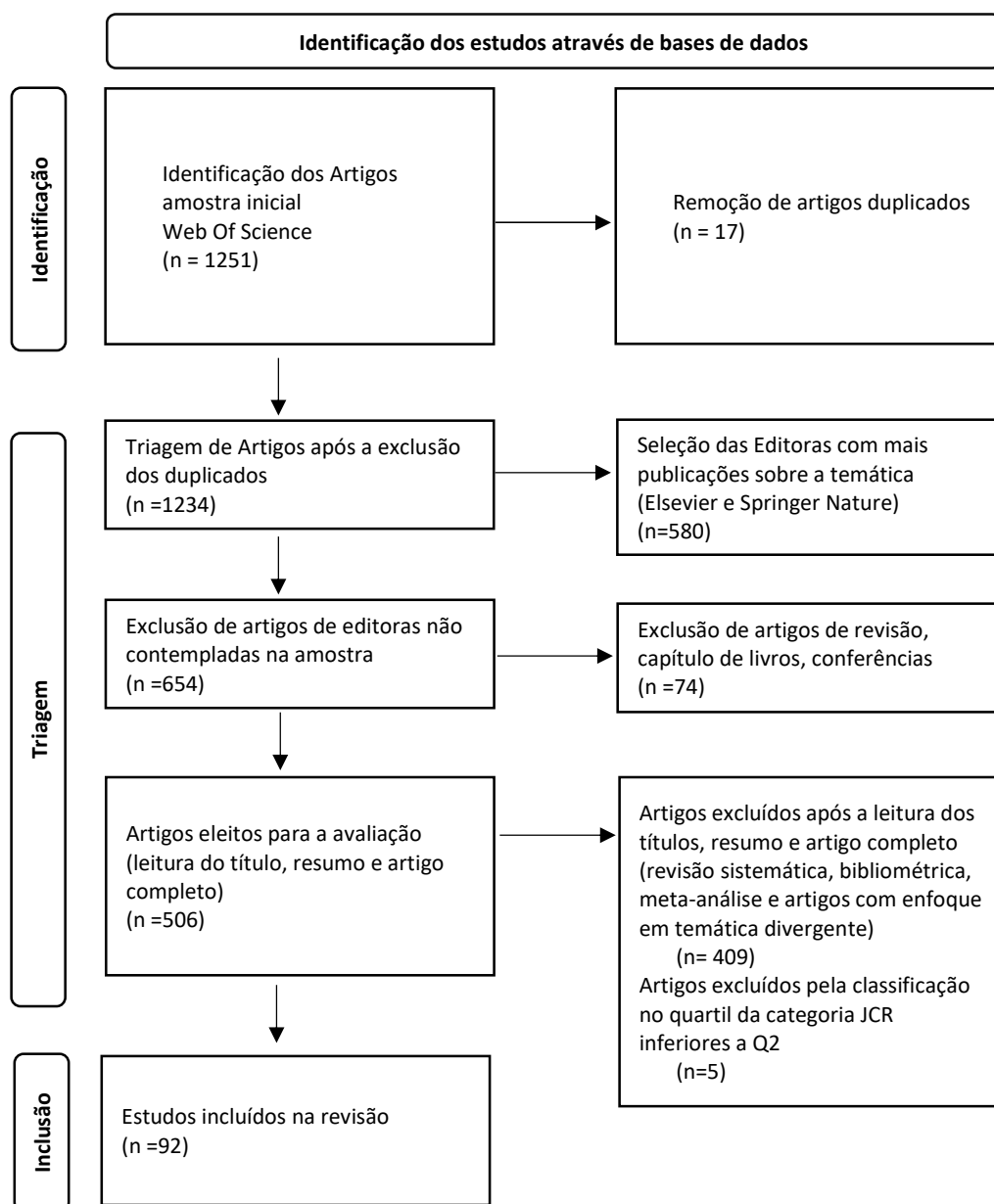


Figura 1. Fluxograma PRISMA para revisões sistemáticas
Fonte: Dados da Pesquisa (2025).

2.2 Análise dos dados

Para a análise dos dados utilizou-se uma abordagem quantitativa para 92 artigos, contemplando o serviço ecossistêmico. Especificamente, o armazenamento de carbono e a análise de viabilidade econômica de sistemas agroflorestais.

Essa análise justifica-se, pois uma metodologia adequada para a mensuração do balanço de carbono e análise econômica de sistemas agroflorestais, considerando o crédito de carbono, proporciona a implementação de projetos de compensação de carbono para o pagamento desses

serviços ecossistêmicos, no mercado de carbono internacional. Na análise quantitativa foi extraída especificamente de cada artigo, o ano de publicação, artigos mais citados, quantidade de artigos por periódicos, nuvem de palavras e área geográfica em que o estudo foi realizado. Já para a análise qualitativa foram identificadas as metodologias para a mensuração de serviços ecossistêmicos de carbono e a análise econômica de sistemas agroflorestais.

3.3. Resultados

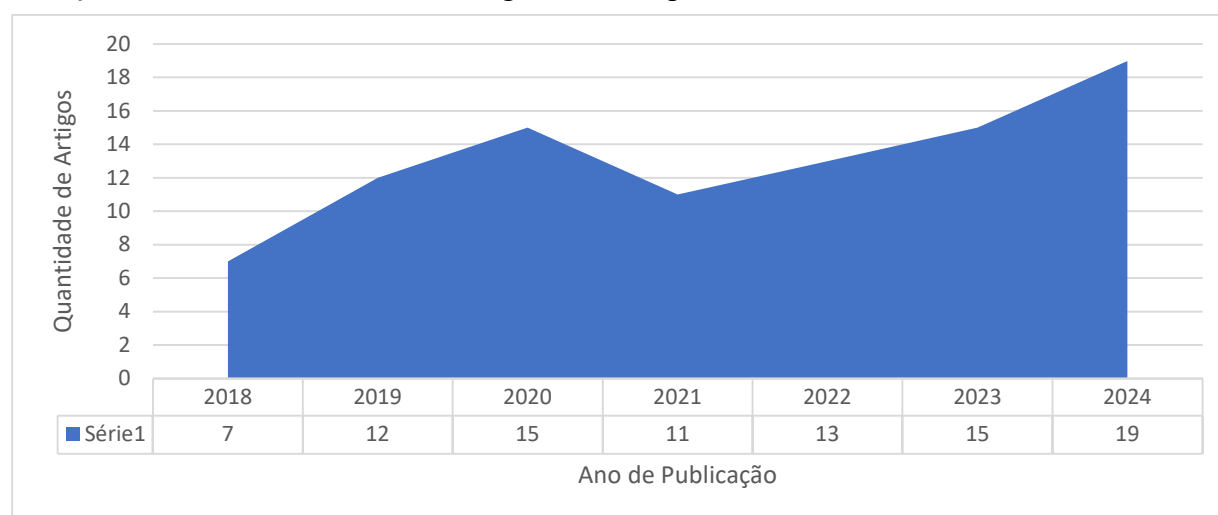
Vários estudos abordam a temática sobre sistemas agroflorestais na comunidade científica internacional. Esta revisão sistemática se concentra em analisar metodologias ambientais e econômicas, com enfoque no serviço ecossistêmico de carbono. Desse modo, os resultados do estudo foram divididos em duas partes: análise quantitativa e análise qualitativa. Para a análise quantitativa foram analisadas as publicações por ano, os artigos mais citados, o número de artigos por revista, nuvem de palavras e a localização geográfica em que o estudo foi desenvolvido. Para análise qualitativa considerou-se a análise de metodologias para a avaliação econômica e serviços ecossistêmicos de carbono, em sistemas agroflorestais.

3.1. Análise quantitativa

Na análise quantitativa foram mapeadas a produção científica com foco em metodologia ambiental e econômica de sistemas agroflorestais, objetivando-se o mercado de carbono. Para isso, utilizou-se critérios de inclusão e exclusão que resultou em uma amostra de 92 artigos.

Na Figura 2, destaca-se o número de publicações de artigos por ano. Observa-se que o número de publicações oscila ao longo do período, apresentando um crescimento até 2020, seguido de uma queda em 2021 e, posteriormente, ocorre um crescimento.

Figura 2. Número de artigos sobre metodologias ambientais e econômicas para mensuração de serviços ecossistêmicos em sistemas agroflorestais por ano, de 2018 a 2024



Fonte: Dados da Pesquisa (2025).

Os resultados sugerem o interesse dos pesquisadores em estudar sistemas que integram espécies arbóreas com cultivos agrícolas e ou pecuária. Além disso, estes sistemas fornecem

diversos serviços ecossistêmicos e são mais adequados ecologicamente. Entretanto, suas análises são dificultadas pela complexidade dos sistemas, devido a integração de diversas espécies, dificuldades de manejo e manutenção, o que pode explicar a diminuição de publicações no ano de 2021, agravada também pelo período da pandemia.

Na Tabela 1, apresenta-se os 10 artigos mais citados, considerando uma amostra de 92 artigos. O artigo mais citado, com 48 citações, foi publicado na revista *Agricultural Systems*, no ano de 2018. Essa revista apresenta um fator de impacto de 6.765, exercendo influência na comunidade científica internacional, com a promoção de avanços científicos e disseminando o conhecimento, no setor do agronegócio.

O diferencial nesse estudo, realizado no Peru, é a análise econômica baseada em dados de 162 propriedades de café. Essa diversificação de dados econômicos em diversas propriedades é uma inovação. Além disso, ocorreu uma análise estatística para identificar a correlação entre as características gerais da produção, manejo, custos e insumos. Essas informações demonstraram que os produtores com sistemas agroflorestais de café, não tinham impactos econômicos negativos, devido ao sombreamento das árvores.

Tabela 1. Artigos sobre metodologias para mensuração de serviços ecossistêmicos em sistemas agroflorestais com maior número de citações em outros periódicos

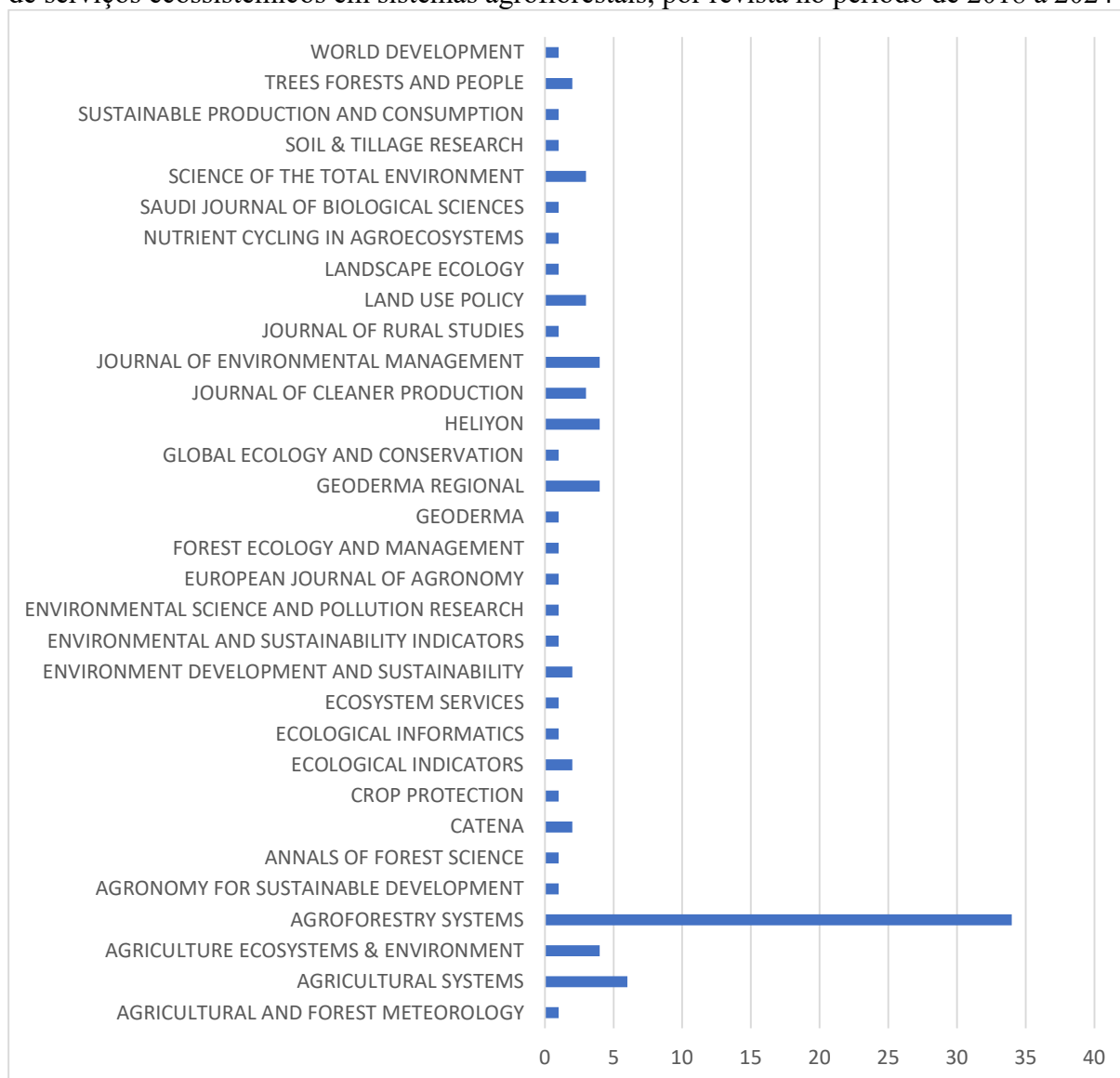
Ordem	Artigos	Quant
1	Effects of shade and input management on economic performance of small-scale Peruvian coffee systems	48
2	Co-benefits and trade-offs of agroforestry for climate change mitigation and other sustainability goals in West Africa	44
3	Carbon stocks and tree diversity in scattered tree silvopastoral systems in Chiapas, Mexico	38
4	Spatial similarities between European agroforestry systems and ecosystem services at the landscape scale	34
5	Soil organic carbon stocks in three Canadian agroforestry systems: From surface organic to deeper mineral soils	30
6	Decision analysis of agroforestry options reveals adoption risks for resource-poor farmers	30
7	Evaluating ecosystem service trade-offs and synergies from slash-and-mulch agroforestry systems in El Salvador	29
8	Carbon storage in a silvopastoral system compared to that in a deciduous dry forest in Michoacan, Mexico	27
9	Modelling and valuing the environmental impacts of arable, forestry and agroforestry systems: a case study	26
10	Decreasing uncertainties and reversing paradigms on the economic performance of agroforestry systems in Brazil	22
11	Approach for optimizing the water-land-food-energy nexus in agroforestry systems under climate change	22

Fonte: Dados da Pesquisa (2025).

Na Figura 3, verifica-se o número de publicações por revistas pela temática abordada, sendo que as revistas que predominam são: *Agroforestry Systems*, *Agricultural Systems*, *Agriculture Ecosystems & Environment* e *Journal of Cleaner Production*, sendo que apresentam no mínimo 3 artigos selecionados, em que o fator de impacto JCR era 2.419, 6.765, 6.576 e 11.072, respectivamente.

Predomina, na revista *Agroforestry Systems*, a publicação sobre a temática de metodologias para a mensuração de serviços ecossistêmicos, totalizando 34 artigos. Isso ocorre porque esse periódico publica diversas abordagens sobre agroflorestas, além de outros sistemas de cultivos que integrem espécies arbóreas.

Figura 3. Quantidade de artigos publicados sobre a temática de metodologias para mensuração de serviços ecossistêmicos em sistemas agroflorestais, por revista no período de 2018 a 2024

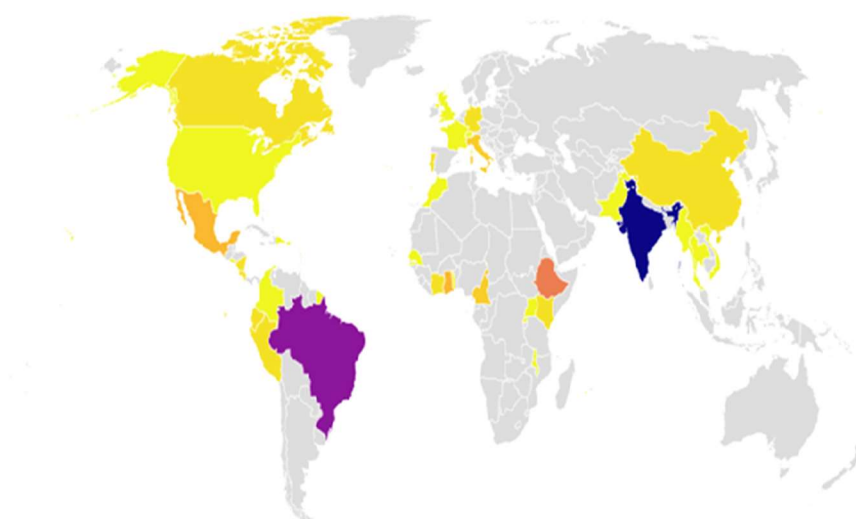


Fonte: Dados da Pesquisa (2025).

Na Figura 4, verifica-se a área onde o estudo foi desenvolvido, considerando uma amostra de 88 artigos, uma vez que 4 artigos relatavam estudos realizados em diversos países da Europa, América Central, África Ocidental e Ásia, dentre eles: Portugal, Espanha, Reino Unido, Suíça, Costa Rica, Guatemala, África Ocidental e Indonésia. Logo, o mapa apresenta a localização geográfica dos estudos, sendo a parte amarela de países com menos estudos e a parte azul escuro concentra mais estudos, sobre a temática.

Localização da área de estudo de cada um dos artigos analisados

Número de Artigos



Legenda	
País	Número de Artigos
Alemanha	2
Brasil	13
Camarões	3
Canadá	2
China	2
Colômbia	1
Costa do Marfim	2
Costa Rica	2
El Salvador	1
Equador	2
Estados Unidos	1
Etiópia	7
França	1
Gana	4
Índia	17
Inglaterra	1
Itália	3
Malawi	1
Marrocos	1
México	4
Myanmar	1
Nicarágua	2
Paquistão	1
Peru	2
Portugal	2
Quênia	2
R. Dominicana	1
Ruanda	1
Senegal	1
Suíça	1
Tailândia	1
Togo	1
Uganda	1
Vietnã	1

Figura 4. Localização da área de estudo de cada um dos artigos analisados.

Fonte: Resultados da Pesquisa (2025).

A partir da Figura 4 é possível identificar que a maioria dos estudos foram realizados na Índia, com 17 artigos, seguidos pelo Brasil, com 13 artigos. No decorrer de sua pesquisa, Ntawuruhunga *et al.* (2023) observaram resultado semelhante, quando encontram 10 pesquisas realizadas na Índia. Entretanto, o foco da pesquisa concentrou-se nos sistemas agroflorestais inteligentes para o clima, especificamente, analisando benefícios como o bem-estar humano, conservação do solo e da água e da bioenergia, respostas às mudanças climáticas, conservação da biodiversidade e gestão da paisagem, com enfoque em atender os objetivos de desenvolvimento sustentável.

Destaca-se que 4 artigos não foram incluídos no mapa, pois o artigo de Kay *et al.*, (2018) analisaram diversos sistemas agroflorestais europeus, no Reino Unido, Portugal, Espanha e Suíça, em que se avaliou o carbono sequestrado pela biomassa abaixo e acima do solo, por meio do modelo EcoYield-SAFE. Outro estudo foi de Giannitsopoulos *et al.* (2020) que modelaram três sistemas para três locais de estudo no Reino Unido, Espanha e Suíça, utilizando um modelo Yield-SAFE, para a cultura e um modelo bioeconômico, o Farm-SAFE. Enquanto, Lalani *et al.*, 2024 avaliaram a viabilidade econômica de sistemas agroflorestais de café, na Costa Rica e Guatemala e Saputra *et al.*, 2024 analisaram benefícios e desvantagens de sistemas agroflorestais e seus serviços multifuncionais, na África Ocidental e Indonésia.

Na Figura 5, apresenta-se as palavras-chave dos 92 artigos analisados. Essa figura representa a frequência em que as palavras chaves são apontadas nos artigos. Desse modo, as palavras com maior frequência são as mais destacadas. Isso demonstra as combinações que devem ser analisadas nos estudos sobre essa temática.

Figura 5. Nuvem de palavras-chave dos artigos selecionados com estudos sobre a mensuração de serviços ecossistêmicos em sistemas agroflorestais, no período de 2018 a 2024



Fonte: Resultados da Pesquisa (2025).

Percebe-se que as palavras mais destacadas são: “Carbon Sequestration”, “Agroforestry” e “Biomass”, identificando a preocupação dos pesquisadores em realizar estudos sobre as agroflorestas e os serviços ecossistêmicos, como o sequestro de carbono, objetivando a mitigação das mudanças climáticas. Ademais, esses sistemas de cultivos também oferecem outros serviços, como provisão, com a produção de alimentos, madeiras e lenhas (Martinelli *et al.*, 2019), o suporte, com a integração das espécies, possibilitando o controle de pragas, a manutenção da biodiversidade, dentre outros (Pulina *et al.*, 2022). Por fim, os serviços culturais, trazendo o bem-estar para as pessoas, como o turismo, a cultura e experiências espirituais (Reang *et al.*, 2021).

3.2. Análise qualitativa

Na análise qualitativa, serão apresentadas as metodologias para avaliação econômica e mensuração de serviços ecossistêmicos, especificamente, a avaliação do balanço de carbono, em sistemas agroflorestais. Nesse contexto, os artigos com metodologias para apuração da emissão do carbono, sequestro do carbono, avaliação econômico-financeira, avaliação monetária do sequestro de carbono, em sistemas agroflorestais, foram analisados.

A análise foi classificada em artigos que utilizaram metodologias para mensuração ambiental, resultando em 66; artigos que utilizaram metodologias para mensuração ambiental e econômica, 20; e, metodologias para mensuração econômica, 6 artigos.

A maioria dos estudos aplicaram metodologias para a apuração do sequestro de carbono, constatando assim uma limitação, a falta de informação sobre a emissão do carbono (Aryal *et al.*, 2019; Jezeer *et al.*, 2019; Kearney *et al.*, 2019; Tschora e Cherubini, 2020). Diversos artigos utilizaram equações alométricas definidas na literatura ou criaram um modelo para estimar a

biomassa das espécies vegetais e do carbono acima e abaixo do solo (Celentano *et al.*, 2019; Nijmeijer *et al.*, 2019; Bagella *et al.*, 2020; Leroux *et al.*, 2022).

Com o foco em uma metodologia para avaliação ambiental, Kay *et al.* (2018) realizaram um estudo de caso, com sistemas agroflorestais europeus. Foram avaliados 7 indicadores de serviços ecossistêmicos como: produção de biomassa, taxa de recarga, lixiviação de nitrato, sequestro de carbono, erosão do solo, polinização e riqueza de *habitat*. Os modelos foram avaliados com base nos mapas de *habitat*. A produção de biomassa das árvores, rendimento das culturas e carbono sequestrado pela biomassa abaixo e acima do solo foram calculadas por meio do modelo EcoYield-SAFE.

Enquanto, Lim *et al.* (2018) analisaram diversos sistemas agroflorestais no Canadá, para avaliar o carbono orgânico no solo e o carbono orgânico dissolvido. Para analisar o carbono foi utilizado uma equação e para o carbono dissolvido foi coletado material do solo úmido e analisado por meio da combustão de alta temperatura. Foram realizados testes de normalidade e homogeneidade de variância pelos testes de Shapiro-Wilk e Levene. Para avaliar os efeitos fixos foi realizado a análise de variância ANOVA.

Para estimar a emissão do carbono, 7 artigos utilizaram a avaliação do ciclo de vida e 2 artigos realizaram a análise emergética. A avaliação do ciclo de vida é uma metodologia com potencialidade de estimar a emissão e impactos ambientais em toda a cadeia de produtos e serviços, desde a instalação até a fase final (Séo *et al.*, 2017; Martinelli *et al.*, 2020). Já a análise emergética verifica as entradas e saídas de um processo de produto e serviço e transforma em fluxo de energia ou coeficiente de energia, possibilitando comparar sistemas produtivos, por meio de sua eficiência energética (Doddabasawa *et al.*, 2020).

Li *et al.* (2021) utilizaram avaliações de ciclo de vida, análises de correlação de Pearson, análises de envoltório de dados e processos de hierarquia analítica, para analisar um modelo de otimização, possibilitando gerenciar recursos como água, terra, alimento e energia, em sistemas agroflorestais. Enquanto, Doddabasawa *et al.* (2019) avaliaram a pegada e os fluxos anuais de carbono em diferentes sistemas agroflorestais tradicionais em ecossistemas contrastantes, por meio da abordagem do ciclo de vida do berço ao portão da fazenda. A biomassa acima e abaixo do solo e o índice de sustentabilidade do carbono foram calculadas com base em equações alométricas apresentadas na literatura e os dados foram analisados por meio de estatística descritiva e ANOVA.

Nesse sentido, Martinelli *et al.* (2019) analisaram um sistema agroflorestal biodiverso, no bioma cerrado, utilizando a avaliação do ciclo de vida (ACV), para estimar o potencial de aquecimento global (GWP). Para o cálculo da biomassa acima e abaixo do solo e índice para cálculo da biomassa total foram utilizados equações e dados da literatura, já o carbono armazenado no solo foi estimado com base em dados secundários. Os resultados apontaram significativa capacidade dos sistemas agroflorestais de sequestrar carbono, com valores negativos de GWP, variando de (-263) a (-496) t CO₂ equivalentes por hectare.

Outros estudos também apontaram o benefício dos sistemas agroflorestais, para armazenamento de carbono. Salamanca *et al.* (2022) combinaram modelos de crescimento e sequestro de carbono em sistemas agroflorestais de cacau, os resultados foram comparados com outros sistemas de cacau e em outros lugares. Para estimar a biomassa em espécies lenhosas, diversas equações alométricas foram utilizadas. A biomassa acima do solo e estoque de carbono foram calculados a partir de índices apresentados na literatura. Os resultados demonstraram que os sistemas agroflorestais de cacau podem fornecer diversos benefícios comparados com sistemas convencionais. O estoque de carbono no ensaio variou de 37,2 a 40,5 Mg C ha⁻¹ aos 20 anos. As espécies madeireiras armazenaram mais de 45% do estoque de carbono em todo o sistema agroflorestal.

Já em sistemas agroflorestais de café, Notaro *et al.* (2022) analisaram a variabilidade de quatro serviços ecossistêmicos. Foram analisados a qualidade da água, conservação e biodiversidade arbórea, sequestro de carbono e rendimento do café. O sequestro de carbono acima do solo, das árvores, foi estimado utilizando equações alométricas. Os resultados apontaram que o sequestro de carbono foi em média de 36 t.ha⁻¹ ano⁻¹.

Em uma abordagem ambiental e econômica Jalón *et al.* (2018); Giannitsopoulos *et al.* (2020); Caicedo-Vargas *et al.* (2022) utilizaram a análise do ciclo de vida e equações alométricas para o cálculo da emissão e do sequestro de carbono. Posteriormente, realizaram análises de desempenho econômico, incluindo valores para as externalidades ambientais.

Já Biswas *et al.* (2022) avaliaram o impacto de diferentes culturas e sistemas agroflorestais com potencial em restaurar a terra degradada e fornecer serviços ecossistêmicos, por meio da análise emergética. Várias equações foram utilizadas para o cálculo da eficiência de energia, biomassa e sequestro de carbono. Para a análise econômica foram utilizadas as seguintes técnicas: retorno líquido, relação custo-benefício, valor presente líquido, valor esperado da terra, valor equivalente anual e fluxo de caixa descontado.

Da mesma forma, Doddabasawa *et al.* (2020) avaliaram o desempenho econômico e a eficiência do uso de energia, em sistemas agroflorestais. Foi realizado a análise emergética do berço ao portão da fazenda. As entradas e saídas, eficiência do uso de energia e energia líquida foram estimados por meio de equações. Já para a análise econômica utilizou-se o retorno líquido e o custo-benefício.

Para quantificar o desempenho econômico, com serviços ecossistêmicos, Laporta *et al.* (2021) avaliaram o sequestro de carbono, em três cenários diferentes de mudança de uso da terra. A avaliação biofísica consistiu em estimar o fluxo líquido de carbono por meio da biomassa. Para determinar o fluxo líquido de carbono utilizou-se modelos de biomassa, equações e parâmetros apresentados no relatório NIR (relatório de inventário nacional de emissões de gases de efeito estufa). A valoração econômica foi realizada considerando esquemas de pagamento por serviços ecossistêmicos. Para precificação de carbono, foram identificados o valor de mercado, o custo social do carbono (SCC) e o preço-sombra do carbono (SPC).

Geralmente, para as análises econômicas, os autores utilizam as técnicas clássicas para avaliar a viabilidade econômica. Nesse sentido, Martinelli *et al.* (2019); Hoa Do *et al.* (2020); Cechin *et al.* (2021) e Gonçalves, Schlindwein e Silva, 2024 empregaram as análises de investimento, Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Relação Custo-Benefício (BCR) e Período de Retorno (PBP).

Por fim, Notaro *et al.* (2020) para avaliar o desempenho econômico, avaliaram a renda anual do cacau, a renda anual das frutas, o valor do autoconsumo e a receita global gerada pela plantação. Enquanto, Jezeer *et al.* (2018) analisaram o rendimento do café, preço do café, qualidade da porta do café, receita bruta, custos, receita líquida, rendimento agrícola e relação custo-benefício. Foi realizado uma análise estatística para verificar a correlação entre características gerais das plantações, variáveis de insumo e manejo e indicadores de custo e benefício. Já para avaliar a diferença no desempenho econômico entre as classes de entrada e classe de sombra utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis e o teste post-hoc de Tukey, com distância qui-quadrado.

A seguir, apresenta-se o Quadro 1, com as metodologias de avaliação econômica e ambiental em artigos científicos, publicados em revistas das editoras Elsevier e Springer Nature, no período de sete anos (2018 a 2024), em sistemas agroflorestais, para a mensuração do sequestro e emissão de carbono. Essas editoras foram selecionadas por representar a maioria dos artigos científicos internacionais, nessa temática, com alto fator de impacto.

Quadro 1- Metodologias para a mensuração de armazenamento e emissão de carbono em sistemas agroflorestais, no período de 2018 a 2024

Tipo de análise	Métodos	Autores
Ambiental		Cárdenas et al., 2018; Khaine et al., 2018; López-Santiago et al., 2018; Aryal et. al., 2019; Celentano et al., 2019; Doddabasawa et al., 2019; Dold et al., 2019; Gebre et al., 2019; Jezeer et al., 2019; Martinelli et al., 2019; Nijmeijer et al., 2019a; Nijmeijer et al., 2019b; Kearney et al., 2019; Yadav et al., 2019; Adhikari et al., 2020; Bagella et al., 2020; Birhane et al., 2020; Chatterjee et al., 2020; Tschora e Cherubini, 2020; Siqueira et al., 2020; Zaro et al., 2020; Cyamweshi et al., 2021; Gebremeskel et al., 2021; Reang et al., 2021; Viaud e Kunnemann, 2021; Zahoor et al., 2021; Andrade et al., 2022; Cardozo et al., 2022; Ferreira-Dominguez et al., 2022; Leroux et al., 2022; Ma et al., 2022; Nath et al., 2022; Notaro et al., 2022; Pulina et al., 2022; Salamanca et al., 2022; Schindler et al., 2023a; Zayani et al., 2023; Andrade, Segura e Suárez, 2023; Fatumah et al., 2023; Schindler et al., 2023b; Verma et al., 2023; Sharma et. al., 2023; Addo-Danso et al., 2024; Yasin et. al., 2024; Rajput et al., 2024; Imbaya et al., 2024; Mellisse, Tolera e Derese, 2024; Asanok et al., 2024; López-Hernández et al., 2024; Ávila-Bello et al., 2024; Silue et al., 2024
	Equações Alométrica Para estimar o sequestro de carbono	
	Modelo EcoYield-SAFE Para estimar o sequestro de carbono	Kay et al., 2018a; Kay et al., 2018b
	Combustão de alta Temperatura/ Walkley-Black /Combustão a Seco/ Combustão úmida - Analisador elementar LECO CHN 628/ Método do cilindro / Digestão com ácido crômico e a análise espectrofotométrica Para análise do carbono orgânico do solo	Lim et al., 2018; López-Santiago et al., 2018; Bagella et al., 2020; Cardozo et al., 2022; Leroux et al., 2022; Steinfeld et al., 2023; Fandi Xu et al., 2023; Primo et al., 2023; Adiyah et al., 2023; Musongora et al., 2023; Maier et al., 2023; Addo-Danso et al., 2024; Kurmi et al., 2024; Rajput et al., 2024; Asanok et al., 2024; López-Hernández et al., 2024; Kaushal et al., 2024; Silue et al., 2024
	Análises Estatística/ Regressão/ Análise de variância ANOVA/ Teste t de Student. Para análise do carbono - efeito do tratamento nos estoques de carbono - incremento do carbono	Nijmeijer et al., 2019; Chatterjee et al., 2020; Pinheiro et al., 2021; Phebe et al., 2022; Fandi Xu et al., 2023; Primo et al., 2023; Musongora et al., 2023; Maier et al., 2023; Addo-Danso et al., 2024; Rajput et al., 2024; Mellisse, Tolera e Derese, 2024; Asanok et al., 2024; López-Hernández et al., 2024; Kaushal et al., 2024; Silue et al., 2024

	Avaliação do Ciclo de Vida Para analisar o impacto ambiental	Doddabasawa et al., 2019; Martinelli et al., 2019; Li et al., 2021;
Econômico	VPL, EAV (valor anual equivalente financeiro), TIR e tempo de retorno, relação custo benefício, valor esperado da terra, fluxo de caixa descontado. Para análise econômica	Hoa Do et al., 2020; Martinelli et al., 2019; Cechin et al., 2021; Gonçalves, Schlindwein e Silva, 2024
	Indicadores econômicos (produtividade, rendimento, custos, receita, valor do autoconsumo)	Jezeer et al., 2018; Notaro et al., 2020
Ambiental e Econômico	VPL, EAV (valor anual equivalente financeiro), TIR e tempo de retorno, relação custo benefício, valor esperado da terra, fluxo de caixa descontado. Para análise econômica	Jalón et al., 2018; Doddabasawa et al., 2020; Gonçalves et al., 2021; Biswas et al., 2022; Agbotui et al., 2023; Caicedo-Vargas et. Al, 2023; Lalani et al., 2024; Saputra et al., 2024; Rezgui et al., 2024; Lucchesi et al., 2024
	Indicadores econômicos e modelos econômicos (produtividade, rendimento, CAP2020+ Eco-Schemes, retornos líquidos do sistema (SNR), lucratividade do sistema (SP) e eficiência econômica relativa (REE), índice de rendimento sustentável	Cerda et al., 2020; Laporta et al., 2021; Rathore et al., 2022; Jawo et al., 2024; Mokria et al, 2024
	Equações Alométrica Para estimar o sequestro de carbono	Walden et al., 2019; Cerda et al., 2020; Doddabasawa et al., 2020; Giannitsopoulos et al.; Rathore et al., 2022, 2020; Asigbaase et al., 2021; Gonçalves et al., 2021; Laporta et al., 2021; Noumi et al., 2018; Biswas et al., 2022; Agbotui et al., 2023; Jawo et al., 2024; Mokria et al, 2024
	Modelo EcoYield-SAFE Para estimar o sequestro de carbono	Jalón et al., 2018
	Análises Estatística/ Análise de variância ANOVA/ teste de Pearson Para verificar se idade influenciava o armazenamento de carbono	Noumi et al., 2018; Jawo et al., 2024; Mokria et al, 2024; Lalani et al., 2024
	Avaliação do Ciclo de Vida Para analisar o impacto ambiental de aquecimento global (GWP)	Jalón et al., 2018; Giannitsopoulos et al., 2020; Caicedo-Vargas et al., 2022; Caicedo-Vargas et. Al, 2023
	Análise Energética Para analisar a sustentabilidade do uso da terra	Doddabasawa et al., 2020; Biswas et al., 2022

Fonte: Dados da pesquisa, 2025

Para calcular a biomassa acima e abaixo do solo diversos artigos utilizaram equações alométricas, principalmente, utilizando o modelo de Chave *et al.* (2005), para calcular a biomassa acima do solo (AGB) e de Cairns *et al.* (1997) e Mokany *et al.* (2006), para calcular a biomassa abaixo do solo (BGB). O carbono orgânico do solo foi analisado mediante amostras do solo por meio de análise laboratorial, conforme as metodologias utilizadas.

Já o modelo EcoYield-SAFE é um aplicativo que faz uma simulação ecofisiológica, por meio de equações implementáveis, ele prevê a captura, crescimento e produção de recursos agroflorestais. Outras variáveis também são analisadas como integração pecuária, produção de

cortiça, produção de frutos, integração de modelos de carbono no solo, lixiviação de azoto. Ele possibilita estimar os efeitos da produção sobre a economia e o meio ambiente de sistemas agroflorestais e fatores como, mudanças climáticas, em diversas espécies arbóreas e culturas em diversos tipos de solo, entretanto, esse modelo está adaptado as condições agroflorestais de sistemas europeus.

As análises econômicas predominantemente utilizaram técnicas de orçamento de capital como: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Payback Descontado, Taxa Interna de Retorno Modificada (TIRM), Índice de Lucratividade (IL) e Valor Anual Uniforme Equivalente (VAUE), que verificam a viabilidade econômica do processo produtivo, além de comparar a viabilidade de diversos sistemas.

Já para a análise ambiental, os pesquisadores utilizaram a análise do ciclo de vida e a análise emergética. Na análise do ciclo de vida, o processo pode ser avaliado desde o seu início, na produção de insumos, transporte e produção até o final, quando o produto deixa de ter utilidade e é descartado. Mas a maioria dos estudos delimita até a produção, quando as mercadorias podem ser consumidas ou vendidas. Esse método é utilizado para avaliar os impactos ambientais, sendo que um dos impactos analisados é a emissão de gases de efeito estufa (GEE) (Li *et al.*, 2021). A análise emergética quantifica o total de energia utilizada na produção dos sistemas agroflorestais, a energia direta e a energia embutida e verifica a sustentabilidade do sistema (Comar, Rodrigues e Ferraz, 2019).

Por fim, várias metodologias foram utilizadas, como técnicas econômicas, ambientais e estatísticas para analisar os diversos serviços ecossistêmicos prestados pela produção agroflorestal.

4. Discussão

Nessa seção, destaca-se os serviços ecossistêmicos e o desempenho econômico dos sistemas agroflorestais, analisando as barreiras e oportunidades para agricultores na adoção destas práticas produtivas.

4.1. Serviços Ecossistêmicos

Diversos serviços ecossistêmicos podem ser ofertados por sistemas agroflorestais, como serviços de provisão, que contemplam os bens extraídos do ecossistema, alimentos, produtos madeireiros e água (Jezeer *et al.*, 2018; Martinelli *et al.*, 2019; Tschora e Cherubini, 2020). Destaca-se os serviços reguladores, como a regulação do clima, purificação da água, controle de pragas, especificamente, o potencial sequestro de carbono, foco dessa revisão sistemática da literatura. Esse serviço possibilita a mitigação das mudanças climáticas (Kay *et al.*, 2018; Lim *et al.*, 2018; Aryal *et al.*, 2019; Kerney *et al.*, 2019; Bagella *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2021; Pulina *et al.*, 2022). Além desses, os serviços culturais são benefícios essenciais oferecidos pelas agroflorestas, como recreações, valores espirituais e religiosos. Para as comunidades indígenas, essas práticas produtivas representam uma ligação entre o humano e o divino e sua sobrevivência está intimamente ligada às agroflorestas (Reang *et al.*, 2021).

Em um estudo de caso, em sistemas agroflorestais europeus, verificou-se o fornecimento de serviços ecossistêmicos. Houve perdas de nitrato, maior sequestro de carbono, preservação do solo, maiores serviços de polinização e maiores *habitats* (Kay *et al.*, 2018). Os SAFS

apresentam sinergias entre regulação de água, controle de pragas e doenças, composição do solo, biodiversidade e valor de produção (Kearney *et al.*, 2019).

No entanto, os sistemas agroflorestais precisam ser planejados e executados com práticas adequadas de manejo. Algumas barreiras impedem os agricultores ao manejo e adoção de novas formas de cultivos nos sistemas agroflorestais, como a falta de conhecimento, dinheiro, falta de tempo e riscos associados a uma nova prática produtiva (Tschora e Cherubini, 2020).

Nesse sentido, Pulina *et al.* (2022) demonstraram o papel relevante da gestão agronômica para garantir o sequestro de carbono em pastagens arborizadas, pois as boas práticas de manejo podem beneficiar a produção e qualidade de pastagens. Salamanca *et al.* (2022) constataram que as agroflorestas de cacau geralmente são planejadas de forma inadequada, o que pode comprometer o sequestro de carbono. Assim, uma melhor gestão na implantação do sistema pode melhorar a produção e o sequestro de carbono, contribuindo com renda para as famílias agricultoras.

Uma das preocupações do manejo agroflorestal refere-se à diminuição de produtividade com o sombreamento, nesse sentido, Jezeer *et al.* (2019) verificaram um aumento na diversidade de espécies e estoque de carbono em plantações com mais sombra e sem redução na produtividade do café. Os resultados sugerem que é possível o manejo de sistemas agroflorestais para fornecer diversos serviços ecossistêmicos sem reduzir a produtividade de café.

A transição por cultivos mais sustentáveis, como os sistemas agroflorestais, é extremamente relevante, dada a perda da biodiversidade em escala global, além disso, diversos serviços ecossistêmicos podem ser fornecidos, além da produção agrícola (Rousseau *et al.*, 2021). Outro ponto de destaque é o potencial do sequestro de carbono em sistemas agroflorestais, esse sistema é mais resiliente às mudanças climáticas. Desse modo, a assistência técnica, troca de conhecimento entre agricultores e aportes financeiros do setor público e privado podem contribuir com a adoção e permanência desses sistemas (Bagella *et al.*, 2020; Cardozo *et al.*, 2022).

4.2. Desempenho Econômico

A geração de renda e a viabilidade econômica de sistemas agroflorestais biodiversos podem contribuir para a transformação da realidade de pequenos produtores, proporcionando a diminuição da pobreza e a melhoria do bem-estar (Jezeer *et al.*, 2018; Cechin *et al.*, 2021). Entretanto, os altos custos de manutenção diminuem os retornos econômicos, gerando defasagem nos anos iniciais. Os agricultores preferem as monoculturas devido aos rendimentos iniciais e curto intervalo de tempo de retorno (Hoa Do *et al.*, 2020). Além disso, existe uma percepção, por parte dos agricultores, de que os monocultivos apresentam melhores desempenhos econômicos (Jezeer *et al.*, 2018).

Essas crenças são barreiras para a transformação produtiva com práticas ecologicamente mais adequadas, como as agroflorestas. Ademais, muitos estudos constataram a viabilidade econômica de sistemas agroflorestais (Martinelli *et al.*, 2019; Cechin *et al.*, 2021; Gonçalves *et al.*, 2021). E, a renda com outros produtos, como a madeira, pode contribuir com os agricultores, com a diversificação de renda (Jezeer *et al.*, 2018).

Porém, Caicedo-Vargas *et al.* (2022) demonstraram que a rentabilidade econômica foi o ponto mais fraco dos sistemas agroflorestais, no Equador. Isso pode comprometer a continuação do manejo desses sistemas. Nesse aspecto, Jalón *et al.* (2018) verificaram que o sistema convencional teve maior resultado econômico, comparado aos sistemas agroflorestais.

No entanto, os sistemas convencionais apresentaram maiores impactos ambientais. Desse modo, quando houve a inclusão econômica dos serviços ecossistêmicos, as agroflorestas apresentaram resultados econômicos semelhante ao convencional e melhor que o florestal.

Outros benefícios apontados por essa prática produtiva são a melhoria na produtividade agrícola, a lucratividade e a qualidade do solo, devido a integração de espécies arbóreas (Rathore *et al.*, 2022). Além disso, melhoram a subsistência e renda dos agricultores e podem ser uma estratégia de resiliência (Biswas *et al.*, 2022). Os sistemas agroflorestais podem restaurar os serviços ecossistêmicos em terras degradadas, melhorando o solo e aumentando a biodiversidade, isso contribui para a biorrecuperação de áreas degradadas (Biswas *et al.*, 2022).

A manutenção de sistemas agroflorestais proporciona sequestro de carbono. Desse modo, os agricultores que optam por esse sistema podem receber por serviços ecossistêmicos e, garantir esses recebimentos, pode proporcionar a adoção dessa prática e promover diversos serviços ecossistêmicos para a sociedade (Laporta *et al.*, 2021). Em um estudo de caso, no Reino Unido, Espanha e Suíça, verificou-se que sistemas agroflorestais emitiram menos CO₂ e sequestraram mais carbono. Assim, os valores monetários permitiram que os sistemas agroflorestais fossem mais lucrativos do que os convencionais ou iguais (Giannitsopoulos *et al.*, 2020).

Nesse cenário, constatou-se, em propriedade com cultivos agroflorestais em Gana, maior crédito de carbono, do que em propriedades convencionais. Isso representa aumento de renda e melhores condições de vida para agricultores (Asigbaase *et al.*, 2021).

Existem barreiras e oportunidades com a adoção de sistemas agroflorestais, entretanto, algumas políticas públicas são necessárias para garantir a continuidade desses sistemas que oferecem diversos benefícios (Cechin *et al.*, 2021). Alguns apontamentos para garantir o caminho para a transformação agroecológica, com sistemas agroflorestais, podem ser apresentados, como: remuneração adequada pela venda dos produtos; escoamento seguro para a produção; subsídios financeiros para auxiliar os agricultores nos primeiros anos; a produção precisa atender apenas a demanda; práticas de manejo devem ser adequadas; os preços de carbono devem ser justos; deve haver apoio das instituições. Algumas soluções como, por exemplo, cooperativas devem ser criadas para facilitar a comercialização de crédito de carbono, colaborando com pequenos agricultores (Walden *et al.*, 2019).

5. Considerações finais

Identificou-se que a maioria dos artigos, com metodologias para a apuração ambiental, com foco no carbono, limitou-se a estimar o sequestro de carbono. Desconsiderando as emissões de carbono pelo manejo dos sistemas agroflorestais. As principais metodologias utilizadas para avaliar serviços ecossistêmicos de carbono, pode ser agrupada, como o sequestro de carbono, em que os autores utilizaram equações alométricas e o Modelo EcoYield-SAFE. Para as análises do carbono do solo, os autores utilizaram análises laboratoriais para avaliar amostras do solo e medir o carbono presente. Para as análises econômicas, os autores utilizaram, predominantemente, o VPL e a TIR. Para analisar o impacto ambiental de aquecimento global (GWP), os autores utilizaram a avaliação do ciclo de vida. Outras análises estatísticas foram utilizadas para avaliar se a idade do sistema agroflorestal influenciava no armazenamento de carbono.

Os sistemas agroflorestais oferecem diversos serviços ecossistêmicos que podem contribuir com os agricultores e, também, com a sociedade em geral. Muitas barreiras podem desestimular o agricultor na adoção e permanência desse sistema, sobretudo, o alto valor do investimento e custos iniciais.

Desse modo, políticas públicas são necessárias para auxiliar agricultores com práticas produtivas mais sustentáveis. O mercado de carbono pode ser uma alternativa para fortalecer a transição da produção agrícola de pequenos agricultores.

Alguns estudos podem não estar na presente amostra, pois outras base de dados não foram incluídas, como o Science Direct, Scielo, Periódico Capes, remetendo a algumas limitações. Ademais, foram analisadas duas editoras, Elsevier e Springer Nature, desse modo a amostra qualitativa poderia ser maior e a análise dessas metodologias deve ser ponderada.

Pesquisas futuras poderiam analisar a viabilidade de diversas espécies, incluindo a rentabilidade com a comercialização da madeira. Além disso, analisar a integração de alguns indicadores socioeconômicos seria mais relevante, a fim de tornar espécies agroflorestais frutíferas e florestais sustentáveis economicamente e permitir o desenvolvimento local. Há lacunas de pesquisa para analisar sistemas agroflorestais com a integração da avaliação ambiental e econômica com a venda por crédito de carbono.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), à Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio na pesquisa.

Referências

- AGUILERA, E. et al. Agroecology for adaptation to climate change and resource depletion in the Mediterranean region. A review. **Agricultural Systems**, v. 181, n. August 2019, p. 102809, 2020.
- ANDRADE, Hernán J.; SEGURA, Milena A.; SUÁREZ, Juan Carlos. Growth and carbon sequestration in biomass of *Cordia alliodora* in Andean agroforestry systems with coffee. **Agroforestry Systems**, v. 97, n. 8, p. 1435-1446, 2023.
- ARYAL, D. R. et al. Carbon stocks and tree diversity in scattered tree silvopastoral systems in Chiapas, Mexico. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 1, p. 213–227, 2019.
- ASIGBAASE, M. et al. Biomass and carbon stocks of organic and conventional cocoa agroforests, Ghana. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 306, n. March 2020, p. 107192, 2021.
- ASSAD, E. D. et al. Adaptação e resiliência de sistemas agrícolas às mudanças climáticas locais e eventos extremos: uma revisão integrativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 52, p. e72899-e72899, 2022.
- BAGELLA, S. et al. Patchy landscapes support more plant diversity and ecosystem services than wood grasslands in Mediterranean silvopastoral agroforestry systems. **Agricultural Systems**, v. 185, n. September, p. 102945, 2020.
- BAKER, E. et al. Mixed farming systems: potentials and barriers for climate change adaptation in food systems. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 62, n. March, p. 101270, 2023.
- BISWAS, B. et al. Agroforestry offers multiple ecosystem services in degraded lateritic soils. **Journal of Cleaner Production**, v. 365, n. June, p. 132768, 2022.
- CAICEDO-VARGAS, C. et al. Assessment of the environmental impact and economic performance of cacao agroforestry systems in the Ecuadorian Amazon region: An LCA approach. **Science of the Total Environment**, v. 849, n. August, 2022.
- CARDOZO, E. G. et al. Agroforestry systems recover tree carbon stock faster than natural succession in Eastern Amazon, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 96, n. 5–6, p. 941–956,

2022.

CECHIN, A.; DA SILVA ARAÚJO, V.; AMAND, L. Exploring the synergy between Community Supported Agriculture and agroforestry: Institutional innovation from smallholders in a Brazilian rural settlement. **Journal of Rural Studies**, v. 81, n. January 2020, p. 246–258, 2021.

CELENTANO, D. et al. Carbon sequestration and nutrient cycling in agroforestry systems on degraded soils of Eastern Amazon, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 5, p. 1781–1792, 2020.

COMAR, V.; RODRIGUEZ, E. O.; FERRAZ, J. M. G. **Etnodesenvolvimento em terras indígenas: uma abordagem integradora**. Dourados: UFGD, 2019.

DO, H.; LUEDELING, E.; WHITNEY, C. Decision analysis of agroforestry options reveals adoption risks for resource-poor farmers. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 40, n. 3, 2020.

DODDABASAWA; CHITTAPUR, B. M.; MAHADEVA MURTHY, M. Comparison of carbon footprint of traditional agroforestry systems under rainfed and irrigated ecosystems. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 2, p. 465–475, 2020a.

DODDABASAWA; CHITTAPUR, B. M.; MAHADEVA MURTHY, M. Economics and energy potential of traditional agroforestry systems under contrasting ecosystems in semi arid tropics. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 6, p. 2237–2247, 2020b.

GARCÍA DE JALÓN, S. et al. Modelling and valuing the environmental impacts of arable, forestry and agroforestry systems: a case study. **Agroforestry Systems**, v. 92, n. 4, p. 1059–1073, 2018.

GIANNITSOPOULOS, M. L. et al. Whole system valuation of arable, agroforestry and tree-only systems at three case study sites in Europe. **Journal of Cleaner Production**, v. 269, 2020.

GONCALVES, N. et al. Potential economic impact of carbon sequestration in coffee agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, v. 95, n. 2, p. 419–430, 2021.

GONÇALVES, Claudia de Brito Quadros; SCHLINDWEIN, Madalena Maria; DA SILVA, Marcelo Corrêa. Economic viability of an agroforestry system for indigenous communities in Brazil: a differentiated approach to risk reduction. **Agroforestry Systems**, v. 98, n. 6, p. 1523–1539, 2024.

JEZEER, R. E. et al. Effects of shade and input management on economic performance of small-scale Peruvian coffee systems. **Agricultural Systems**, v. 162, n. January, p. 179–190, 2018.

JEZEER, R. E. et al. Benefits for multiple ecosystem services in Peruvian coffee agroforestry systems without reducing yield. **Ecosystem Services**, v. 40, n. March, p. 101033, 2019.

KAY, S. et al. Spatial similarities between European agroforestry systems and ecosystem services at the landscape scale. **Agroforestry Systems**, v. 92, n. 4, p. 1075–1089, 2018a.

KAY, S. et al. Landscape-scale modelling of agroforestry ecosystems services in Swiss orchards: a methodological approach. **Landscape Ecology**, v. 33, n. 9, p. 1633–1644, 2018b.

KEARNEY, S. P. et al. Evaluating ecosystem service trade-offs and synergies from slash-and-mulch agroforestry systems in El Salvador. **Ecological Indicators**, v. 105, n. April 2017, p. 264–278, 2019.

KURMI, Bandana et al. Impact of progressive and retrogressive land use changes on ecosystem multifunctionality: Implications for land restoration in the Indian Eastern Himalayan region. **Science of the Total Environment**, v. 912, p. 169197, 2024.

LALANI, Baqir et al. Shade versus intensification: Trade-off or synergy for profitability in coffee agroforestry systems?. **Agricultural Systems**, v. 214, p. 103814, 2024.

LAPORTA, L.; DOMINGOS, T.; MARTA-PEDROSO, C. It's a keeper: Valuing the carbon

- storage service of Agroforestry ecosystems in the context of CAP Eco-Schemes. **Land Use Policy**, v. 109, n. September 2020, p. 105712, 2021.
- LEROUX, L. et al. A spatialized assessment of ecosystem service relationships in a multifunctional agroforestry landscape of Senegal. **Science of the Total Environment**, v. 853, n. May, p. 158707, 2022.
- LI, Z. et al. An economic analysis software for evaluating best management practices to mitigate greenhouse gas emissions from cropland. **Agricultural Systems**, v. 186, n. May 2020, p. 102950, 2021.
- LIM, S. S. et al. Soil organic carbon stocks in three Canadian agroforestry systems: From surface organic to deeper mineral soils. **Forest Ecology and Management**, v. 417, n. January, p. 103–109, 2018.
- LOW, G.; DALHAUS, T.; MEUWISSEN, M. P. M. Mixed farming and agroforestry systems: A systematic review on value chain implications. **Agricultural Systems**, v. 206, n. September 2022, p. 103606, 2023.
- MARTINELLI, G. DO C. et al. Environmental performance of agroforestry systems in the Cerrado biome, Brazil. **World Development**, v. 122, p. 339–348, 2019a.
- MARTINELLI, G. DO C. et al. Decreasing uncertainties and reversing paradigms on the economic performance of agroforestry systems in Brazil. **Land Use Policy**, v. 80, n. September 2018, p. 274–286, 2019b.
- NIJMEIJER, A. et al. Carbon dynamics in cocoa agroforestry systems in Central Cameroon: afforestation of savannah as a sequestration opportunity. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 3, p. 851–868, 2019.
- NOTARO, M. et al. How to increase the joint provision of ecosystem services by agricultural systems. Evidence from coffee-based agroforestry systems. **Agricultural Systems**, v. 196, n. March 2021, 2022.
- NOTARO, M.; GARY, C.; DEHEUVELS, O. Plant diversity and density in cocoa-based agroforestry systems: how farmers' income is affected in the Dominican Republic. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 3, p. 1071–1084, 2020.
- NTAWURUHUNGA, D. et al. Climate-smart agroforestry systems and practices: A systematic review of what works, what doesn't work, and why. **Forest Policy and Economics**, v. 150, n. September 2022, p. 102937, 2023.
- ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Disponível em: <<http://www.nacoesunidas.org>>. acesso em 18 de abril de 2023.
- PANTERA, A. et al. Agroforestry and the environment. **Agroforestry Systems**, v. 95, n. 5, p. 767–774, 2021.
- PULINA, A. et al. Tree cover influences the soil C balance in Mediterranean cork oak-based silvopastoral systems. **Soil and Tillage Research**, v. 215, n. October 2021, p. 105234, 2022.
- RAHMAN, S. A. et al. Integrating bioenergy and food production on degraded landscapes in Indonesia for improved socioeconomic and environmental outcomes. **Food and Energy Security**, v. 8, n. 3, p. 1–13, 2019.
- RATHORE, S. S. et al. Integrated agroforestry systems improve soil carbon storage, water productivity, and economic returns in the marginal land of the semi-arid region. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 29, n. 10, p. 103427, 2022.
- REANG, D. et al. Assessing tree diversity and carbon storage during land use transitioning from shifting cultivation to indigenous agroforestry systems: Implications for REDD+ initiatives. **Journal of Environmental Management**, v. 298, n. June, p. 113470, 2021.
- ROUSSEAU, G. X. et al. Shade tree identity rather than diversity influences soil macrofauna in cacao-based agroforestry systems. **Pedobiologia**, v. 89, n. December 2020, 2021.

- SALAMANCA, A. J. A. et al. Linking growth models and allometric equations to estimate carbon sequestration potential of cocoa agroforestry systems in West Africa. **Agroforestry Systems**, v. 96, n. 8, p. 1249–1261, 2022.
- SANTIAGO-FREIJANES, J. J. et al. Global and European policies to foster agricultural sustainability: agroforestry. **Agroforestry Systems**, v. 95, n. 5, p. 775–790, 2021.
- SAPUTRA, Danny Dwi et al. Avoidance of tree-site mismatching of modelled cacao production systems across climatic zones: Roots for multifunctionality. **Agricultural Systems**, v. 216, p. 103895, 2024.
- SCARAZATTI, B.; NOGUEIRA JUNIOR, L. R. Fórum Ambiental da Alta Paulista. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 18, p. 15–22, 2022.
- SCHWARZ, J.; SCHNABEL, F.; BAUHUS, J. A conceptual framework and experimental design for analysing the relationship between biodiversity and ecosystem functioning (BEF) in agroforestry systems. **Basic and Applied Ecology**, v. 55, p. 133–151, 2021.
- SEO, H. L. S. et al. Avaliação do ciclo de vida na bovinocultura leiteira e as oportunidades ao Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 221–237, 2017.
- TSCHORA, H.; CHERUBINI, F. Co-benefits and trade-offs of agroforestry for climate change mitigation and other sustainability goals in West Africa. **Global Ecology and Conservation**, v. 22, 2020.
- WALDÉN, P.; OLLIKAINEN, M.; KAHILUOTO, H. Carbon revenue in the profitability of agroforestry relative to monocultures. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 1, p. 15–28, 2020.