ReGeo ISSN: 2177-3246

RUMO À INTEGRAÇÃO DOS MERCADOS DE CARBONO E DA AGRICULTURA FAMILIAR: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA E BIBLIOMÉTRICA DA LITERATURA

TOWARDS THE INTEGRATION OF CARBON MARKETS AND FAMILY FARMING: A SYSTEMATIC AND BIBLIOMETRIC LITERATURE REVIEW

HACIA LA INTEGRACIÓN DE LOS MERCADOS DE CARBONO Y LA AGRICULTURA FAMILIAR: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA Y BIBLIOMÉTRICA DE LA LITERATURA

https://doi.org/10.56238/revgeov17n11-146

Data de submissão: 25/10/2026 **Data de publicação:** 25/11/2026

Aldnira Tolentino Nogueira
Mestra em Ciências Ambientais
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
E-mail: aldniraagro@gmail.com

Joselisa Maria Chaves
Doutora em Geologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
E-mail: joselisa@uefs.br

Rodrigo Nogueira de Vasconcelos
Doutor em Ecologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
E-mail: rnv@uefs.br

Washington de Jesus Sant'Anna da Franca Rocha
Doutor em Geologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
E-mail: wrocha@uefs.br

RESUMO

Os mercados de carbono têm sido apresentados como instrumento capaz de remunerar práticas agrícolas que aumentam o sequestro de carbono, mas sua escalabilidade e eficácia para a agricultura familiar continuam pouco exploradas. Este trabalho mapeou e sintetizou a produção científica sobre a interface entre mercados de carbono e agricultura familiar, identificando tendências, estrutura temática, padrões de colaboração, oportunidades e barreiras à inclusão dos pequenos produtores. Utilizando uma revisão de literatura de métodos mistos, o estudo analisa um corpus de 331 artigos publicados entre 1998 e 2025 e retirados do banco de dados Scopus. A metodologia combina técnicas bibliométricas quantitativas, incluindo mapeamento de redes de coocorrência e colaboração, com síntese temática qualitativa para estruturar a análise. A produção anual passou de um artigo por ano no final da década de 1990 para uma média de 32,8 artigos por ano em 2020–2025, com 69 artigos em 2025; 60% do corpus foi publicado a partir de 2020. A rede de coocorrência (59 termos em dez agrupamentos) articula tecnologias de monitoramento, práticas regenerativas e instrumentos de mercado. Dez países concentram 60,1% das relações de coautoria internacional, lideradas por Estados Unidos (9,7%), Reino Unido (8,6%) e China (7,8%), e dez periódicos reúnem 24,8% dos artigos, com destaque para o Journal of Environmental Management. A perspectiva econômica predomina (48,7% dos estudos), seguida das

abordagens multidimensional (26%) e ambiental (13,2%). O mercado de carbono é identificado como um mecanismo potencial para recompensar financeiramente agricultores por práticas sustentáveis, como sequestro de carbono e regeneração do solo. No entanto, sua implementação é dificultada por consideráveis barreiras, incluindo protocolos complexos de certificação, infraestrutura inadequada e altos custos de transação que impedem a participação dos pequenos produtores. A revisão também evidencia um desequilíbrio estrutural na colaboração internacional e uma lacuna na validação de modelos de quantificação de carbono (SWAT, RothC, DayCent) para a escala da agricultura familiar. As conclusões restringem-se a artigos indexados no Scopus. Os resultados fornecem uma base para políticas públicas inclusivas, alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, focadas em acesso tecnológico, simplificação da entrada no mercado e distribuição equitativa de benefícios.

Palavras-chave: Créditos de Carbono. Pequenos Produtores. Serviços Ecossistêmicos. Bibliometria. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

ABSTRACT

Carbon markets have been presented as an instrument capable of rewarding agricultural practices that increase carbon sequestration, but their scalability and effectiveness for family farming remain underexplored. This study mapped and synthesized the scientific literature on the interface between carbon markets and family farming, identifying trends, thematic structure, collaboration patterns, opportunities and barriers to the inclusion of smallholders. Using a mixed-methods literature review, the study analyzes a corpus of 331 articles published between 1998 and 2025 and retrieved from the Scopus database. The methodology combines quantitative bibliometric techniques, including co-occurrence and collaboration network mapping, with qualitative thematic synthesis to structure the analysis. Annual output rose from one article per year in the late 1990s to an average of 32.8 articles per year in 2020–2025, with 69 articles in 2025; 60% of the corpus was published from 2020 onwards. The co-occurrence network (59 terms in ten clusters) links monitoring technologies, regenerative practices and market instruments. Ten countries account for 60.1% of international co-authorship links, led by the United States (9.7%), the United Kingdom (8.6%) and China (7.8%), and ten journals publish 24.8% of the articles, led by the Journal of Environmental Management. The economic perspective predominates (48.7% of studies), followed by multidimensional (26%) and environmental (13.2%) approaches. The carbon market is identified as a potential mechanism to financially reward farmers for sustainable practices such as carbon sequestration and soil regeneration. However, its implementation is hindered by considerable barriers, including complex certification protocols, inadequate infrastructure and high transaction costs that prevent smallholder participation. The review also reveals a structural imbalance in international collaboration and a gap in the validation of carbon quantification models (SWAT, RothC, DayCent) at the scale of family farming. The conclusions are restricted to Scopus-indexed articles. The results provide a basis for inclusive public policies, aligned with the Sustainable Development Goals, focused on technological access, simplified market entry and equitable benefit sharing.

Keywords: Carbon Credits. Smallholders. Ecosystem Services. Bibliometrics. Sustainable Development Goals.

RESUMEN

Los mercados de carbono se han presentado como un instrumento capaz de remunerar prácticas agrícolas que aumentan el secuestro de carbono, pero su escalabilidad y eficacia para la agricultura familiar siguen poco exploradas. Este trabajo mapeó y sintetizó la producción científica sobre la interfaz entre mercados de carbono y agricultura familiar, identificando tendencias, estructura temática, patrones de colaboración, oportunidades y barreras para la inclusión de los pequeños

productores. Mediante una revisión de literatura de métodos mixtos, el estudio analiza un corpus de 331 artículos publicados entre 1998 y 2025 y recuperados de la base de datos Scopus. La metodología combina técnicas bibliométricas cuantitativas, incluido el mapeo de redes de coocurrencia y de colaboración, con una síntesis temática cualitativa para estructurar el análisis. La producción anual pasó de un artículo por año a finales de la década de 1990 a un promedio de 32,8 artículos por año en 2020–2025, con 69 artículos en 2025; el 60% del corpus se publicó a partir de 2020. La red de coocurrencia (59 términos en diez agrupamientos) articula tecnologías de monitoreo, prácticas regenerativas e instrumentos de mercado. Diez países concentran el 60,1% de las relaciones de coautoría internacional, lideradas por Estados Unidos (9,7%), Reino Unido (8,6%) y China (7,8%), y diez revistas reúnen el 24,8% de los artículos, con destaque para el Journal of Environmental Management. Predomina la perspectiva económica (48,7% de los estudios), seguida de los enfoques multidimensional (26%) y ambiental (13,2%). El mercado de carbono se identifica como un mecanismo potencial para recompensar financieramente a los agricultores por prácticas sostenibles, como el secuestro de carbono y la regeneración del suelo. Sin embargo, su implementación se ve dificultada por barreras considerables, como protocolos de certificación complejos, infraestructura inadecuada y altos costos de transacción que impiden la participación de los pequeños productores. La revisión también evidencia un desequilibrio estructural en la colaboración internacional y una laguna en la validación de modelos de cuantificación de carbono (SWAT, RothC, DayCent) a la escala de la agricultura familiar. Las conclusiones se restringen a artículos indexados en Scopus. Los resultados ofrecen una base para políticas públicas inclusivas, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, centradas en el acceso tecnológico, la simplificación de la entrada al mercado y la distribución equitativa de beneficios.

Palabras clave: Créditos de Carbono. Pequeños Productores. Servicios Ecosistémicos. Bibliometría. Objetivos de Desarrollo Sostenible.

1 INTRODUÇÃO

O Acordo de Paris de 2015 levou as nações a se comprometerem a limitar o aquecimento global a bem menos de 2 °C, perseguindo o limite de 1,5 °C, meta cuja viabilidade depende de reduções profundas de emissões e de remoções de carbono em larga escala, inclusive na agricultura e no uso da terra (IPCC, 2022; Roe *et al.*, 2021). Neste campo emergente de políticas públicas, a agricultura foi reformulada como um pilar da mitigação por meio do mercado de carbono, que compensa as emissões de gases de efeito estufa (GEE) por meio de créditos comerciais gerados por práticas agrícolas que aumentam o sequestro de carbono. No entanto, a implantação em larga escala desse modelo continua sendo difícil de alcançar, especialmente para a agricultura de pequenos produtores. Os sistemas alimentares respondem por cerca de um terço das emissões antrópicas de GEE (Crippa *et al.*, 2021) e, ao mesmo tempo, estão entre os setores mais vulneráveis às mudanças climáticas, com os atuais esforços de adaptação se mostrando insuficientes (Lipper *et al.*, 2014). Consequentemente, identificar caminhos que conciliem mitigação e meios de subsistência rurais tornou-se uma prioridade urgente em pesquisa e políticas públicas.

O setor agrícola ocupa um nexo crítico entre ecossistemas e sociedade. A variabilidade climática já afeta os preços dos alimentos, a segurança alimentar e os padrões de uso do solo. Ao mesmo tempo, os solos agrícolas constituem um dos maiores reservatórios terrestres de carbono, e práticas de manejo que aumentam o carbono orgânico do solo figuram entre as soluções climáticas naturais de maior potencial e menor custo (Lal, 2004; Paustian *et al.*, 2016; Bossio *et al.*, 2020).

Nesse contexto, o mercado de carbono funciona como um "pagamento ecológico", compensando produtores que adotam práticas que capturam carbono e conservam ecossistemas. Em teoria, esses mercados geram novas fontes de receita para as famílias rurais enquanto avançam objetivos climáticos. Na prática, porém, sua escalabilidade e eficácia para agricultores familiares continuam pouco exploradas, especialmente no que diz respeito à certificação de crédito e à integração de pequenos produtores nas cadeias globais de valor. Avaliações independentes mostram que parte dos créditos florestais e agrícolas emitidos nos mercados voluntários superestima as reduções efetivamente obtidas, o que tem levado a um escrutínio crescente sobre adicionalidade, permanência e vazamento (Thamo; Pannell, 2016; West *et al.*, 2023; Pande, 2024). Estruturas institucionais em nível local, essenciais para monitoramento, relato e verificação (MRV), são frequentemente fracas, e metodologias padronizadas para quantificar o sequestro de carbono baseado em solo e biomassa ainda estão em evolução (Smith *et al.*, 2020; Oldfield *et al.*, 2022).

Algumas iniciativas tentam reduzir a lacuna entre a agricultura familiar e o financiamento de carbono, notadamente os esquemas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) que recompensam

práticas sustentáveis (Wunder *et al.*, 2020). Embora promissores, os programas de PSA frequentemente têm dificuldades em distribuir benefícios de forma equitativa, tendendo a favorecer grandes proprietários e agravando disparidades sociais (McAfee, 2012; Muradian *et al.*, 2013; Börner *et al.*, 2017). Instrumentos de governança privada, como esquemas voluntários de certificação de carbono do solo, agora oferecem prêmios de preço para produtores que aumentam o carbono orgânico do solo (Johansson; Andersson; Fischer, 2025). No entanto, quantificar e atribuir com precisão resultados de carbono em nível agrícola continua sendo tecnicamente desafiador. Sistemas robustos de MRV são essenciais para transparência, custo-efetividade e confiança dos investidores.

Para que os mecanismos de incentivo mudem o comportamento na fazenda, eles devem ser economicamente viáveis para os participantes. Agricultores familiares enfrentam obstáculos estruturais como infraestrutura limitada, propriedades fragmentadas e altos custos de transação que dificultam sua participação em esquemas de certificação (Tang *et al.*, 2016; Wongpiyabovorn; Plastina; Crespi, 2023). Projetos em países em desenvolvimento enfrentam custos particularmente onerosos para avaliações básicas, verificações periódicas e registro de mercado (Okoli; Birkenberg, 2024). Experiências como o Projeto de Carbono Agrícola do Quênia ilustram tanto a promessa quanto as armadilhas do financiamento de carbono, demonstrando como o design de projetos pode tanto empoderar quanto marginalizar os agricultores (Lee *et al.*, 2016). A questão é relevante em escala global, pois os estabelecimentos com menos de 2 ha representam cerca de 84% das unidades produtivas do mundo (Lowder; Sánchez; Bertini, 2021), e, no Brasil, a agricultura familiar é uma categoria legalmente definida e prioritária na política nacional de PSA (Brasil, 2006; Brasil, 2021).

Apesar da expansão recente da literatura, faltam sínteses que articulem, em um mesmo quadro analítico, as tendências bibliométricas do campo e as evidências sobre a inclusão da agricultura familiar nos mercados de carbono; revisões bibliométricas anteriores trataram do comércio de carbono em manejo florestal comunitário (Putra *et al.*, 2026), sem focalizar os pequenos produtores agrícolas. Para explorar essas questões, este estudo adota uma revisão de literatura de métodos mistos, integrando síntese temática qualitativa e abordagens bibliométricas sistemáticas e quantitativas para mapear debates predominantes e evidências empíricas (Galvão; Pluye; Ricarte, 2017). Essa abordagem captura a amplitude de perspectivas disciplinares e contextos geográficos.

Nesse contexto, o presente estudo pergunta: Quais tendências principais a literatura científica revela no ponto de encontro entre o mercado de carbono e a agricultura familiar? O objetivo geral deste trabalho é mapear e sintetizar a produção científica indexada no Scopus entre 1998 e 2025 sobre a interface entre mercados de carbono e agricultura familiar, identificando tendências, estrutura temática, padrões de colaboração, oportunidades e barreiras à inclusão dos pequenos produtores, de modo a

subsidiar políticas públicas alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). De forma específica, buscou-se:

1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) caracterizar a evolução temporal da produção científica sobre mercados de carbono e agricultura (1998–2025) e identificar seus marcos de inflexão;
b) descrever a estrutura temática do campo por meio da rede de coocorrência de termos e de seus agrupamentos;
c) analisar os padrões de colaboração internacional e identificar os países, periódicos e autores mais produtivos;
d) sintetizar, por leitura temática, as abordagens predominantes, os modelos de quantificação de carbono empregados e as barreiras e oportunidades para a agricultura familiar, situando-as em relação aos ODS e ao contexto brasileiro.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MERCADOS DE CARBONO: ORIGEM, EVOLUÇÃO E TIPOLOGIA

O mercado de carbono, conforme definido na literatura fundamental (Shin; Miah; Lee, 2007), envolve um sistema onde as emissões de gases de efeito estufa (GEE) são comercializadas, permitindo que entidades negociem permissões de emissão para cumprir metas de redução, frequentemente influenciadas por políticas de tributação de carbono. A evolução desse conceito (Silveira; Oliveira, 2021) pode ser rastreada pelas seguintes décadas-chave:

Anos 1990: Início e o Protocolo de Kyoto. A Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED) de 1992 estabeleceu a Agenda 21, iniciando discussões formais sobre mecanismos baseados no mercado. Isso culminou no Protocolo de Kyoto de 1997, que criou o primeiro marco internacional para o comércio de emissões.

Anos 2000: Desenvolvimento de Mecanismos de Mercado. Esta década viu a operacionalização dos principais mercados de carbono, incluindo o lançamento em 2005 do Sistema Europeu de Comércio de Emissões (EU ETS), o maior do mundo. O relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 2007 solidificou ainda mais o consenso científico sobre a redução de GEE, fortalecendo o impulso do mercado.

Anos 2010: Expansão e Consolidação. Os mecanismos do Protocolo de Kyoto, como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (CDM), tornaram-se totalmente operacionais, permitindo que países em desenvolvimento gerem e vendam créditos de carbono. O Acordo de Paris de 2015 marcou uma mudança crucial, garantindo o compromisso universal com a redução dos GEE e dando maior ênfase a soluções baseadas na natureza e à maior precificação do carbono, o que impulsionou a expansão do mercado voluntário de carbono.

Anos 2020: Foco na Sustentabilidade e Adoção Global. Esse período é caracterizado por implementações nacionais significativas, incluindo o lançamento do maior mercado doméstico do mundo pela China em 2020 e a introdução do Mecanismo de Ajuste de Fronteiras de Carbono (CBAM) pela UE em 2021. O mercado voluntário continuou seu rápido crescimento e, em 2024, o Brasil estabeleceu seu próprio mercado regulado por meio da Lei nº 15.042, Sistema Brasileiro de Comércio de Gases de Efeito Estufa (SBCE), posicionando o país como um ator-chave na estratégia climática global.

Distinguem-se, assim, os mercados regulados, nos quais um teto de emissões é imposto a setores obrigados e as permissões são negociadas (*cap and trade*), e os mercados voluntários, nos quais empresas e indivíduos adquirem créditos gerados por projetos de redução ou remoção, inclusive agrícolas e florestais (Pande, 2024). No mercado voluntário, os créditos de carbono do solo passaram a ser ofertados por programas privados que certificam práticas como plantio direto, culturas de cobertura e manejo de pastagens; o mapeamento global desses programas revela desenhos heterogêneos de quantificação, de duração dos contratos e de repartição das receitas, com concentração na América do Norte, na Europa e na Austrália (Johansson; Andersson; Fischer, 2025). No Brasil, a Lei nº 15.042/2024 instituiu o SBCE, que combina um mercado regulado para grandes emissores com o reconhecimento de créditos do mercado voluntário e excluiu a produção primária agropecuária das obrigações do mercado regulado, de modo que a participação da agricultura ocorre sobretudo pela geração de créditos voluntários (Brasil, 2024).

2.2 CARBONO NO SOLO, PRÁTICAS AGRÍCOLAS E INTEGRIDADE DOS CRÉDITOS

O interesse pelos créditos de carbono agrícola decorre do potencial de mitigação dos solos: práticas de manejo que aumentam o carbono orgânico do solo, como plantio direto, culturas de cobertura, sistemas agroflorestais e aplicação de biochar, podem contribuir simultaneamente para a mitigação, a segurança alimentar e a resiliência dos sistemas produtivos (Lal, 2004; Paustian *et al.*, 2016), e estima-se que o carbono do solo responda por cerca de um quarto do potencial das soluções

climáticas naturais (Bossio *et al.*, 2020). A conversão desse potencial em créditos, porém, exige demonstrar adicionalidade, permanência e ausência de vazamento, além de quantificar variações de estoque pequenas em relação à variabilidade espacial e temporal do solo (Thamo; Pannell, 2016; Smith *et al.*, 2020).

Essas exigências tornam a integridade dos créditos agrícolas objeto de controvérsia. Críticos apontam que o carbono do solo é reversível, que os ganhos saturam ao longo do tempo e que estimativas baseadas em modelos podem superestimar as remoções (Amundson; Biardeau, 2018). A avaliação comparativa de protocolos de créditos de carbono do solo evidenciou grande heterogeneidade nos requisitos de amostragem, nas linhas de base e no tratamento da permanência (Oldfield *et al.*, 2022). No âmbito florestal, a análise de projetos REDD+ indicou que a maioria não reduziu o desmatamento na magnitude creditada (West *et al.*, 2023), o que reforça a demanda por salvaguardas de integridade em todos os mercados de base territorial (Pande, 2024).

2.3 AGRICULTURA FAMILIAR, PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS E INCLUSÃO

No Brasil, a agricultura familiar é definida pela Lei nº 11.326/2006 com base no tamanho do estabelecimento (até quatro módulos fiscais), na predominância da mão de obra familiar e na origem da renda (Brasil, 2006). Em escala global, os estabelecimentos com menos de 2 ha correspondem a 84% das unidades produtivas, mas ocupam cerca de 12% das terras agrícolas (Lowder; Sánchez; Bertini, 2021), o que torna a agregação de muitos produtores uma condição para qualquer projeto de carbono em escala.

Os PSA constituem o instrumento mais difundido para remunerar produtores por serviços ecossistêmicos. Revisões de sua eficácia indicam ganhos ambientais modestos e dependentes do desenho — condicionalidade, focalização espacial e adicionalidade —, com resultados distributivos frequentemente desfavoráveis aos mais pobres (Börner *et al.*, 2017; Wunder *et al.*, 2020). A literatura crítica alerta para a "atração fatal" das soluções ganha-ganha, que tendem a ocultar conflitos entre eficiência e equidade (Muradian *et al.*, 2013), e para a reprodução de desigualdades quando serviços ecossistêmicos são mercantilizados (McAfee, 2012). A economia da agricultura de carbono indica que a adoção depende do preço do carbono, dos custos de oportunidade e dos custos de transação, frequentemente proibitivos para pequenas áreas (Tang *et al.*, 2016; Wongpiyabovorn; Plastina; Crespi, 2023), e análises recentes argumentam que os créditos de carbono do solo, tal como desenhados, não entregam justiça climática aos agricultores (Moinet, 2026). No Brasil, a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais, instituída pela Lei nº 14.119/2021, definiu agricultores familiares, povos indígenas e comunidades tradicionais como prioritários (Brasil, 2021), criando a base

legal para articular PSA e mercados de carbono — articulação que esta revisão busca situar na literatura internacional.

3 METODOLOGIA

3.1 DESENHO GERAL DO ESTUDO

Esta investigação utilizou um protocolo de revisão de literatura de métodos mistos que integra técnicas bibliométricas convencionais com avaliação qualitativa e quantitativa de conteúdo e procedimentos selecionados de revisões sistemáticas (Quadro 1), seguindo recomendações para revisões mistas e bibliométricas (Galvão; Pluye; Ricarte, 2017; Purssell; McCrae, 2020; Donthu *et al.*, 2021) e desenho semelhante ao adotado por Vasconcelos *et al.* (2024). Ao combinar múltiplas abordagens analíticas, buscamos construir uma compreensão mais abrangente dos avanços do mercado de carbono na agricultura, dando atenção especial à categoria social de *Agricultura familiar*. Paralelamente, foi implementada uma análise de redes de coocorrência de termos para destacar tendências temáticas emergentes. Os procedimentos detalhados para cada componente metodológico estão descritos abaixo.

Quadro 1. Sinopse das ligações entre questões de pesquisa, técnicas analíticas e fontes de dados.

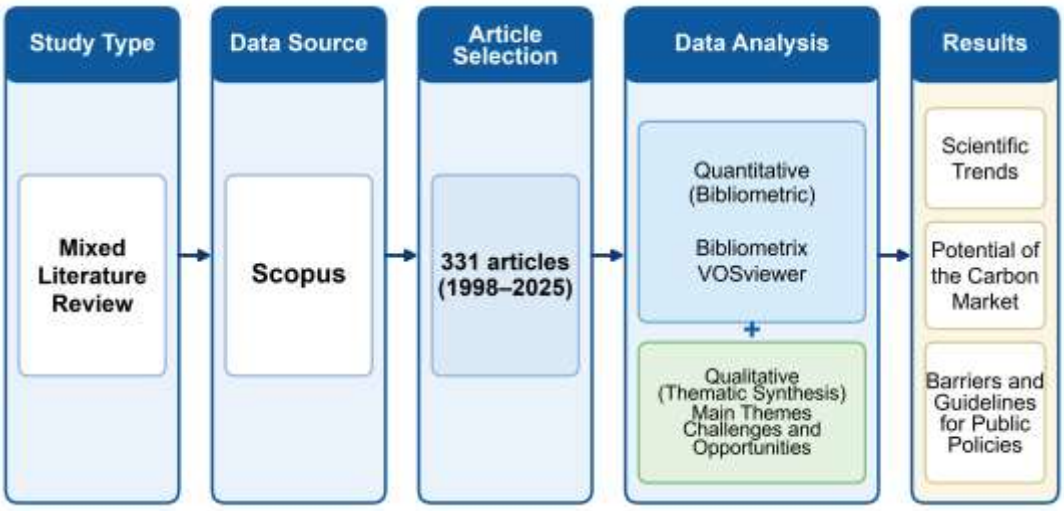
Perguntas	Análise	Dados de origem
1. Quais são os padrões de tendência de publicação na agricultura de mercado de carbono?	Bibliometria descritiva	Conjunto completo de dados
2. Qual revista publica o maior volume de artigos sobre mercados de carbono e agricultura?		
3. Quais países lideram a produção de conhecimento nesse domínio?		
4. Qual é o grau de colaboração internacional?		
5. Quem são os autores mais prolíficos?		
6. Quais temas-chave, pontos focais e abordagens multidimensionais dominam a pesquisa sobre sequestro de carbono na agricultura?	Rede de coocorrência	Conjunto completo de dados / documentos mais citados filtrados
7. Onde esses estudos foram realizados geograficamente?	Leitura detalhada	Documentos mais citados filtrados
8. Como as tendências de publicação se manifestam dentro dos modelos de mercado de carbono para agricultura familiar?		

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025

A Figura 1 ilustra o fluxo de trabalho sequencial adotado para cada etapa metodológica, desde a interrogação do banco de dados até a criação do conjunto de dados curado. A revisão não foi registrada em plataforma de protocolos; os itens de relato da declaração PRISMA 2020 (Page *et al.*,

2021) foram adotados como referência para a descrição da busca, dos critérios e da triagem, mas o número de registros em cada etapa não foi contabilizado pelos autores, o que é discutido na seção 4.8.

Figura 1. Fluxo de trabalho da revisão de literatura de métodos mistos: tipo de estudo, fonte de dados (Scopus), seleção dos artigos (n = 331; 1998–2025), análise de dados (bibliometria quantitativa com Bibliometrix e VOSviewer e síntese temática qualitativa) e resultados esperados (tendências científicas, potencial do mercado de carbono e barreiras e diretrizes para políticas públicas). Nota: os rótulos da figura estão em inglês.



Nota: os rótulos da figura estão em inglês.
Fonte: Elaborado pelos autores, 2025

3.2 BASE DE DADOS

O Scopus foi selecionado como fonte principal de dados devido à sua ampla cobertura disciplinar, indexação robusta de periódicos revisados por pares e funcionalidade avançada de busca. Essa escolha está alinhada com o arcabouço metodológico mais amplo, que exige metadados de alta qualidade e bem curados para fundamentar as análises bibliométricas e cientiométricas subsequentes. A base reúne dezenas de milhões de registros de dezenas de milhares de títulos de periódicos, anais e livros, com informações de citação padronizadas (Elsevier, 2024). A restrição a uma única base, contudo, implica viés de cobertura em favor de periódicos em língua inglesa, discutido na seção 4.8.

3.3 STRING DE BUSCA, FILTROS E TRIAGEM

Uma consulta booleana personalizada, combinando vocabulário controlado e descritores em texto livre do mercado de carbono, agricultura de pequenos produtores ou familiares e práticas agrícolas regenerativas, foi construída para maximizar tanto a sensibilidade quanto a especificidade. A consulta foi aplicada aos campos título, resumo e palavras-chave (TITLE-ABS-KEY) e está organizada no Quadro 2 em três blocos de termos combinados pelo operador AND, com os filtros aplicados na própria base.

Uma vez estabelecida a cadeia mestra de termos, uma cascata de filtros foi aplicada para aprimorar o foco analítico. Restringir o *SRCTYPE* a periódicos revisados por pares ("j") e o *DOCTYPE* a artigos de pesquisa completos ("ar") excluiu literatura cinza, anais de conferências, capítulos de livros e artigos de revisão, garantindo assim consistência metodológica e rigor científico. O conjunto inicial de recuperação foi exportado para softwares de gestão de referências, onde rotinas automatizadas de deduplicação e verificações manuais eliminaram registros redundantes.

Após a implantação desses filtros, baixamos os registros bibliográficos resultantes e executamos um protocolo de triagem em duas etapas. A Fase 1 implementou critérios rigorosos de inclusão direcionados a estudos que examinaram explicitamente os mecanismos do mercado de carbono dentro dos sistemas de agricultura familiar, particularmente aqueles que abordam práticas regenerativas, resultados de sequestro de carbono e possibilitação de estruturas de políticas públicas. A Fase 2 envolveu uma triagem de relevância na qual títulos e resumos dos artigos foram avaliados independentemente por dois revisores; qualquer registro cuja relevância permanecesse ambígua avançava para a avaliação em texto completo. As discrepâncias foram resolvidas por consenso para garantir rigor metodológico. Registros considerados irrelevantes, por exemplo, aqueles que tratavam apenas de questões de política tangencial, ou que careciam de dados empíricos, foram descartados. Do corpus inicial, 331 artigos atenderam a todos os critérios de inclusão, o que corresponde a 85% dos registros recuperados após os filtros; o número absoluto de registros recuperados em cada etapa não foi registrado pelos autores.

Quadro 2. Estrutura da string de busca aplicada no Scopus (campos TITLE-ABS-KEY) e filtros utilizados.

Componente	Termos (combinados por OR dentro de cada bloco)
Bloco 1 – sistemas agrícolas	"agricultura*" OR "agricultura sustentável" OR "agricultura de precisão" OR "agricultura rural" OR "agricultura orgânica" OR "agricultura de conservação" OR "segurança alimentar" OR "agricultura inteligente" OR "agrobiologia" OR "agricultura regenerativa" OR "sistemas de agricultura familiar" OR "agricultura em larga escala" OR "PNAE" OR "PAA" OR "sistema agroflorestal"
Bloco 2 – carbono e mitigação	"baixo carbono" OR "EU-ETS" OR "emissões de gases de efeito estufa" OR "curva MAC" OR "custo da redução de CO_2" OR "compensações de carbono" OR "REDD" OR "transações de carbono" OR "ligações de carbono" OR "captura de carbono" OR "mitigação de emissões" OR "monitoramento de emissões" OR "neutralidade de carbono" OR "carbono social" OR "descarbonização" OR "ciclagem de carbono" OR "bioenergia com captura e armazenamento de carbono" OR "sumidouro de carbono" OR "ecossistemas de carbono" OR "balanço de carbono"
Bloco 3 – instrumentos de mercado	"mercado de carbono" OR "crédito de carbono" OR "certificado de carbono" OR "precificação de carbono" OR "imposto sobre carbono" OR "comércio de emissões de carbono" OR "sistema de comércio de emissões" OR "fundo de projetos de carbono" OR "projeto de carbono" OR "fundo rotativo de carbono" OR "investimentos verdes" OR "modelagem econômica de carbono" OR "cap and trade carbono"
Operadores	Bloco 1 AND Bloco 2 AND Bloco 3
Filtros	PUBYEAR > 1995; tipo de fonte: periódico (SRCTYPE "j"); estágio de publicação: final (PUBSTAGE "final"); tipo de documento: artigo (DOCTYPE "ar"); ano de publicação até 2025

Nota: os termos são reproduzidos na versão em português fornecida pelos autores; a expressão original em inglês aplicada na interface do Scopus deve ser consultada para reprodução exata da busca (ver seção 4.8).
Fonte: Elaborado pelos autores, 2025

3.4 ANÁLISES BIBLIOMÉTRICAS

Com base nos procedimentos de coleta e triagem de dados detalhados nas seções 3.1–3.3, implementamos uma análise bibliométrica quantitativa em duas frentes que combinou o pacote Bibliometrix 3.0 (Aria; Cuccurullo, 2017) com o VOSviewer 1.6.20 (Van Eck; Waltman, 2010).

Para construir redes de coocorrência, exportamos registros de texto simples contendo títulos, resumos e palavras-chave fornecidas pelo autor. No VOSviewer, ativamos a opção de mapeamento baseado em dados de texto, adotamos o método de contagem binária e estabelecemos um corte inicial de frequência de ≥ 5 ocorrências para termos individuais. Um arquivo de dicionário de sinônimos personalizado foi adicionado para mesclar variantes lexicais (singular/plural, grafia britânica/americana) e corrigir redundâncias semânticas; após a consolidação, impusemos um limiar mais rigoroso de ≥ 10 ocorrências para manter apenas os nós mais salientes, assim aprimorando a resolução do cluster enquanto preservávamos a completude analítica. Os mapas resultantes foram

inspecionados quanto à modularidade, densidade do cluster e centralidade dos termos para garantir consistência interpretativa em todo o conjunto de dados.

Análises paralelas no Bibliometrix quantificaram a produtividade dos autores, resultados nacionais, padrões internacionais de colaboração, tendências temporais de publicação, estruturas de coautoria e métricas de impacto das citações. A segmentação temporal (1998–1999, 2000–2009, 2010–2019 e 2020–2025) permitiu o cálculo de médias anuais, desvios-padrão, variâncias e taxas de crescimento composto, garantindo assim estatísticas temporais comparáveis. Para a rede de colaboração entre países, extraímos as afiliações de autores do corpus curado e as agregamos em nível nacional; foi então gerada uma rede de coautoria ponderada e não direcionada, na qual cada nó representa um país e o peso de cada aresta corresponde ao número de artigos coautorados. Todos os procedimentos estatísticos foram roteirizados em R 4.0.4 (R Core Team, 2021) e executados em RStudio 1.4.1106 (RStudio Team, 2021), garantindo total reprodutibilidade e controle transparente de versões em todo o pipeline analítico.

3.5 SÍNTESE TEMÁTICA QUALITATIVA

A componente qualitativa correspondeu às questões 6 a 8 do Quadro 1. Os documentos mais citados foram lidos integralmente e classificados quanto (i) à abordagem predominante — econômica, ambiental, social, política ou multidimensional —, (ii) à região geográfica do estudo e (iii) aos modelos e ferramentas de quantificação de carbono empregados. O número de documentos submetidos à leitura integral e a planilha de codificação constam do Material Suplementar referido pelos autores, não anexado a esta versão. As percentagens das abordagens temáticas apresentadas na seção 4.6 referem-se a essa classificação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 EVOLUÇÃO TEMPORAL DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA

Após aplicar os filtros pré-definidos, realizar as etapas de triagem e avaliação crítica, e fundir o banco de dados bibliográfico com insights da revisão narrativa, recuperamos um corpus final de 331 artigos revisados por pares que investigam o mercado de carbono no contexto da agricultura. As estatísticas descritivas do corpus são apresentadas na Tabela 1 e a evolução temporal da produção, na Figura 2.

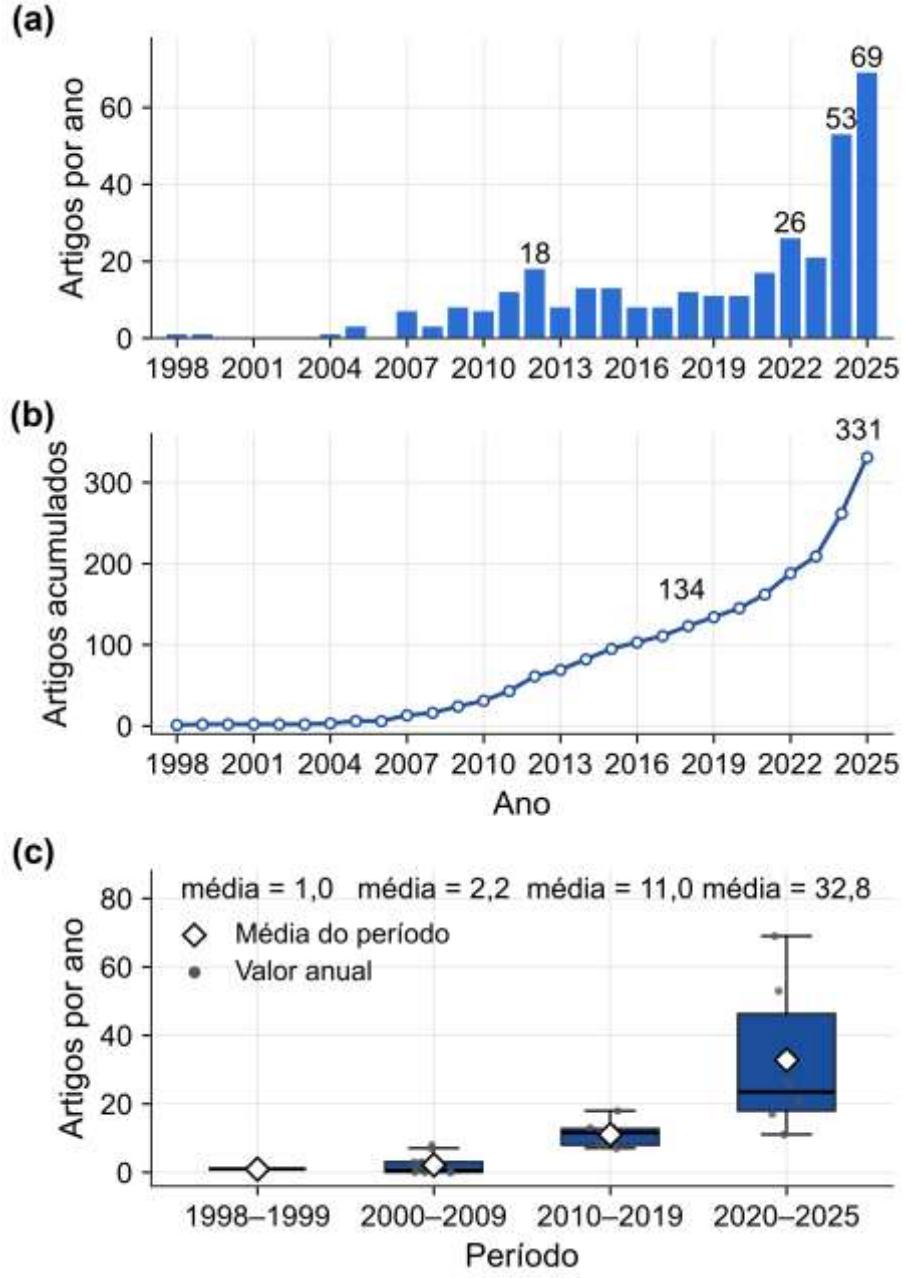
Tabela 1. Estatísticas gerais sobre fontes de publicação, autoria e colaboração por período no corpus de pesquisa sobre agricultura no contexto do mercado de carbono (1998–2025).

Indicador	1998–1999	2000–2009	2010–2019	2020–2025	1998–2025
Fontes (periódicos)	2	21	90	134	213
Documentos	2	22	110	197	331
Taxa anual de crescimento (%)	0	51,57	5,15	44,37	16,98
Autores	5	62	447	872	1.352
Documentos de autor único	1	4	9	14	28
Coautores por documento	2,50	2,95	4,25	4,82	4,49
Coautoria internacional (%)	0	27,27	42,73	29,95	33,84

Fonte: Elaborada pelos autores

A inspeção da produção anual (Figura 2a) revela uma trajetória pronunciada, quase exponencial. De uma fase incipiente no final dos anos 1990, a produção anual aumentou gradualmente até 2010 e depois acelerou acentuadamente, culminando em um pico histórico em 2025. A curva acumulada (Figura 2b) destaca essa aceleração, confirmando um ponto de ruptura estrutural e não uma tendência meramente linear. Essa inflexão coincide com marcos de política global, como o segundo período de compromisso do Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris, além da expansão dos incentivos tecnológicos, econômicos e sociopolíticos que, coletivamente, intensificaram o interesse em pesquisa.

Figura 2. Evolução da produção científica sobre mercados de carbono e agricultura no corpus analisado (n = 331; 1998–2025): (a) número de artigos por ano; (b) número acumulado de artigos; (c) distribuição dos valores anuais por período, com mediana (linha), média (losango) e valores anuais (pontos).



Fonte: Elaborada pelos autores a partir dos dados do levantamento na base Scopus (Elsevier, 2024), realizado em 2025.

A Figura 2c desagrega os mesmos dados por período e ressalta a magnitude dessa mudança. Enquanto as décadas de 1990 e 2000 geraram apenas 2 e 22 artigos, respectivamente, os anos 2010 registraram 110 publicações, seguidos por 197 apenas na primeira metade da década de 2020. Quantitativamente, a década de 1990 foi caracterizada por uma única publicação por ano, indicativa de uma fase embrionária de pesquisa com dispersão negligenciável (DP = 0,0). Durante 2000–2009, a média subiu modestamente para 2,2 artigos ano^{-1} (DP = 3,05; variância = 9,29), refletindo explosões esporádicas de produtividade intercaladas com períodos de inatividade. Uma consolidação marcante

surgiu em 2010–2019, quando a produção média foi de 11,0 artigos ano^{-1} (DP = 3,37; variância = 11,33) e quase quintuplicou em relação à década anterior, coincidindo com oportunidades de financiamento ampliadas e redes colaborativas voltadas para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU de 2015. O aumento mais pronunciado ocorreu em 2020–2025, com uma média de 32,83 artigos ano^{-1} (DP = 22,93); somente 2025 gerou 69 publicações, a maior contagem anual da série, e os anos de 2024 e 2025 respondem, juntos, por 36,9% do corpus. Esse aumento está alinhado com incentivos políticos como a Lei nº 15.042/2024 do Brasil, que estabeleceu o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE) (Brasil, 2024), e com uma adoção mais ampla de tecnologias de mitigação climática.

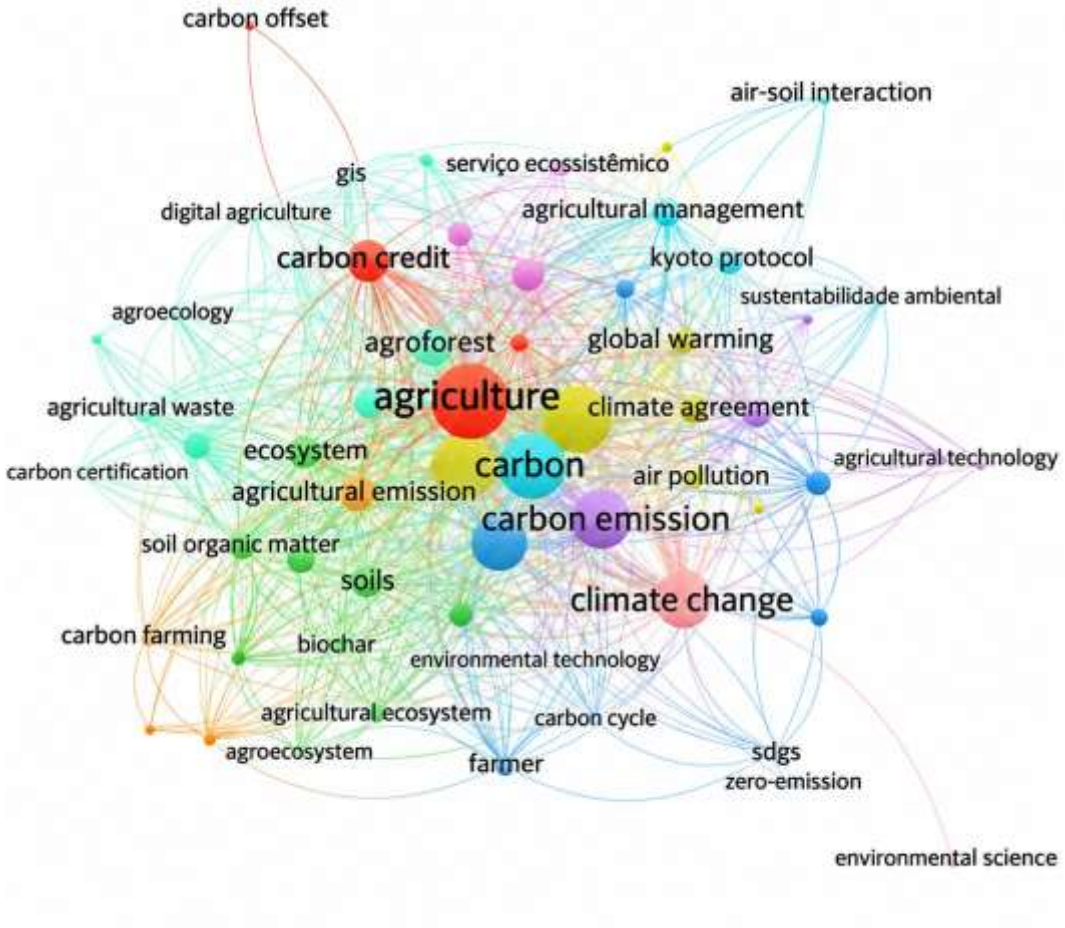
Juntos, esses padrões corroboram os indicadores bibliométricos relatados na Tabela 1, que detalham a evolução dos periódicos fonte, redes de autores e agrupamentos colaborativos ao longo das décadas: a taxa anual de crescimento composta de 16,98% no período completo, o aumento do número médio de coautores por documento (de 2,50 para 4,82) e a coautoria internacional em um terço dos documentos (33,84%) apontam para um domínio de pesquisa em amadurecimento e rápida expansão, posicionado na interseção entre finanças de carbono e sustentabilidade agrícola. Três fatores parecem centrais para essa aceleração: (i) crescente pressão internacional por cadeias de suprimentos sustentáveis após o Acordo de Paris, em 2015; (ii) maior conscientização de que a agricultura atua tanto como fonte quanto como sumidouro de carbono, levando ao escrutínio de sua integração nos esquemas de comércio de carbono; e (iii) rápida difusão de geotecnologias, sensoriamento remoto, análise de dados em grande escala e modelos baseados em processos, que agora permitem estimativas de resolução mais fina das emissões agrícolas e do potencial de sequestro de carbono. Esse padrão é coerente com a "corrida pelo carbono" nas terras agrícolas descrita por Johansson, Andersson e Fischer (2025), marcada pela multiplicação de programas voluntários de créditos de carbono do solo a partir do final da década de 2010, e com o crescimento recente de revisões bibliométricas sobre comércio de carbono em sistemas comunitários (Putra *et al.*, 2026).

4.2 ESTRUTURA TEMÁTICA: REDE DE COOCORRÊNCIA DE TERMOS

Para elucidar a estrutura temática do debate científico sobre mercados de carbono na agricultura, geramos uma rede de coocorrência de termos (Figura 3) a partir de 59 termos extraídos dos títulos, resumos e palavras-chave das publicações abrangendo os últimos 28 anos. A rede compreende 59 itens organizados em 10 clusters distintos, com 715 links e força total de links de 3.170. Dez agrupamentos estatisticamente robustos (modularidade = 0,78; silhueta média = 0,72) foram mantidos para interpretação. Abaixo, discutimos cada grupo em ordem decrescente de número de

termos, enfatizando como os subtemas retratam coletivamente a evolução das questões de pesquisa e abordagens analíticas nesse domínio.

Figura 3. Rede de coocorrência de termos extraídos dos títulos, resumos e palavras-chave dos 331 artigos analisados (VOSviewer). Os nós representam termos, com tamanho proporcional à frequência; as arestas refletem a força da coocorrência; as cores indicam os dez agrupamentos temáticos, que abrangem agricultura, sustentabilidade, ODS, serviços ecossistêmicos, mercado de carbono e geotecnologias.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025

O Cluster 1 (11 termos) ocupa o quadrante superior esquerdo e agrega terminologia ligada a tecnologias agrícolas sustentáveis e ferramentas de mitigação baseadas em prática, notadamente *agroecologia*, *agrofloresta* e *gestão de resíduos*, juntamente com construções técnicas como *certificação de carbono*, *sumidouro de carbono* e *estimativa de estoques*. A presença da *agricultura digital*, *SIG*, *sensoriamento remoto* e *espectrometria* demonstra como plataformas de monitoramento espacialmente explícito se tornaram indispensáveis para quantificar as emissões e estoques de carbono nas fazendas com alta resolução temporal. Esse resultado converge com a literatura que situa no MRV o principal gargalo técnico dos créditos de carbono agrícola (Smith *et al.*, 2020; Okoli; Birkenberg, 2024).

Imediatamente adjacente, o Cluster 2 (9 termos) destaca a interface solo–carbono em sistemas regenerativos. Conceitos como *biochar*, *matéria orgânica do solo* e *rotação de culturas* coocorrem com *ecossistemas agrícolas* e *pegada de carbono*, revelando uma linha de pesquisa integrativa que conecta indicadores de saúde do solo à geração de créditos de carbono. A menção recorrente à *biomassa* indica interesse na permanência do carbono, enquanto *rotação* e *insumos orgânicos* significam resiliência impulsionada pela biodiversidade. Juntos, esses termos sustentam uma narrativa em que a agricultura regenerativa cumpre simultaneamente metas de mitigação e a ampla prestação de serviços ecossistêmicos, em linha com as sínteses sobre o papel do carbono do solo nas soluções climáticas naturais (Paustian *et al.*, 2016; Bossio *et al.*, 2020) e com modelos de inventário para adições de biochar (Woolf *et al.*, 2021).

O Cluster 3 (8 termos) conecta a prática local às necessidades globais de descarbonização. Nós como *descarbonização da agricultura*, *ciclo do carbono* e *emissões líquidas zero* estão diretamente relacionados aos *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)* e à *tomada de decisões em nível de agricultor*, enquanto *a análise espacial* reflete a operacionalização desses conceitos por meio da modelagem geoespacial. Este agrupamento destaca uma mudança metodológica das avaliações em escala de parcelas para escalas de paisagem e políticas, alinhando os caminhos de mitigação agrícola com os ODS 1, 2, 3, 12 e 13 (Xu; Wang, 2024).

O Cluster 4 (7 termos) enfatiza a conexão entre mercadoria e emissão. Ele vincula *commodities* agrícolas e *emissões de gases de efeito estufa* aos *mercados de carbono* e *acordos climáticos* (por exemplo, Kyoto, Paris), destacando como atores da cadeia de valor internalizam externalidades por meio de mecanismos de mercado.

O Cluster 5 (6 termos) muda o foco para a inovação tecnológica na agroindústria. Aqui, *tecnologia ambiental*, o *método Delphi* e *sustentabilidade* agrupam-se com *emissões de carbono* e *agrotecnologia*, indicando um corpo de trabalho que suscita consenso de especialistas para priorizar tecnologias de mitigação. O Cluster 6 (5 termos) destaca estruturas integradas de gestão sob regulação internacional: a co-localização da *gestão agrícola*, *interação solo-ar* e *carbono* com o *Protocolo de Kyoto* sinaliza um engajamento robusto com sistemas contábeis baseados em regras.

O Cluster 7 (4 termos) se agrupa em torno de instrumentos de mercado que apoiam sistemas sustentáveis e agroflorestais. Termos como *taxa de carbono agrícola*, *agricultura de carbono* e *crédito* alinham-se com alavancas práticas de mitigação como *biochar*, *utilização de resíduos agrícolas* e matéria orgânica aprimorada, ilustrando como a precificação do carbono incentiva transições regenerativas de uso da terra que se alinham com compromissos climáticos mais amplos; a avaliação de uma taxa de carbono na África do Sul, por exemplo, indicou efeitos líquidos positivos sobre o setor

de alimentos quando a receita é reciclada (Ntombela; Bohlmann; Kalaba, 2019). O Cluster 8 (4 termos) forma o núcleo conceitual da rede, onde *a agricultura* se interliga com *créditos de carbono*, *compensação* e *monitoramento ambiental*. A proeminência da *certificação* e as referências a plataformas digitais (por exemplo, QGIS) apontam para um paradigma que combina inventários de emissões com protocolos de verificação de crédito.

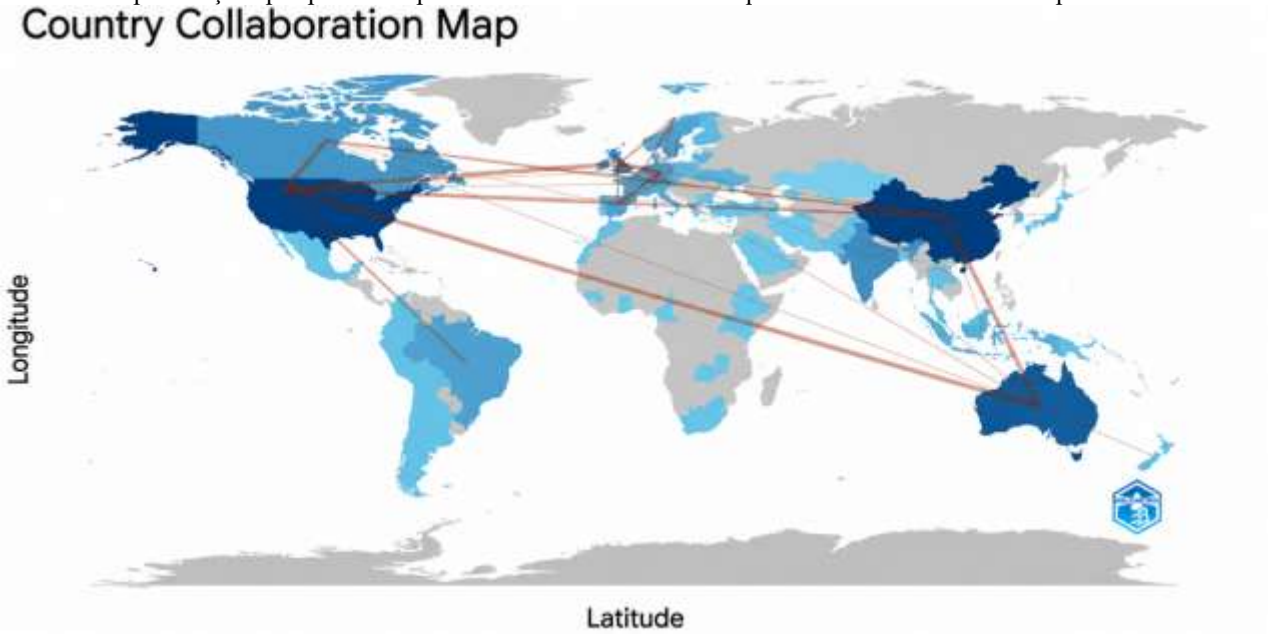
O Cluster 9 (3 termos) delimita os mecanismos de mudança de uso do solo e REDD+. A estreita associação entre *mudança de uso do solo*, *REDD* e *serviços ecossistêmicos* revela uma narrativa de mitigação focada no desmatamento evitado e na valorização dos benefícios ecossistêmicos não mercantis. Debates contínuos sobre a eficácia da implementação do REDD+ surgem por meio de citações que discutem os compromissos socioambientais, em particular o potencial de sistemas agroflorestais de pequenos produtores da África Subsaariana como mecanismo de REDD+ (Thangata; Hildebrand, 2012) e as evidências recentes de que muitos projetos REDD+ creditaram reduções de desmatamento não verificadas (West *et al.*, 2023). Por fim, o Cluster 10 (2 termos) encapsula a interface entre a ciência das mudanças climáticas e as ciências ambientais em geral, atuando como um pivô semântico que integra questões de pesquisa biofísica com estruturas interdisciplinares de mitigação.

Coletivamente, os dez clusters demonstram um alinhamento progressivo de métodos empíricos que vão desde diagnósticos de sensoriamento remoto até instrumentos econômicos orientados por políticas, com o objetivo geral de reduzir as emissões de gases de efeito estufa agrícolas enquanto aprimoram a resiliência dos ecossistemas. A análise da rede também demonstra uma forte interconexão entre práticas agrícolas, mecanismos de mercado como o REDD+ e compromissos climáticos internacionais como o Acordo de Paris, refletindo a crescente integração da agricultura na política ambiental global. No entanto, a análise também expõe desafios persistentes relacionados à adaptação dessas estratégias a contextos agrícolas diversos, especialmente para pequenas fazendas e agroecossistemas que requerem apoio tecnológico e político personalizado (Thangata; Hildebrand, 2012; Okoli; Birkenberg, 2024).

4.3 COLABORAÇÃO INTERNACIONAL ENTRE PAÍSES

A rede de coautoria entre países (Figura 4) foi renderizada com um layout orientado por forças, com a largura das arestas escalada logaritmicamente e o tamanho do nó mapeado para a frequência de publicação, o que permite uma comparação direta dos laços bilaterais e multilaterais entre os principais contribuintes para esse campo.

Figura 4. Mapa de colaboração entre países na rede de coautoria do corpus (Bibliometrix). A intensidade do azul indica o número de publicações por país e a espessura das linhas reflete a frequência de coautoria entre os países conectados.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025

A Figura 4 revela um cenário de pesquisa altamente interconectado, dominado por um conjunto relativamente pequeno de nações. Os Estados Unidos ocupam a posição mais central, formando as bordas mais densas e extensas, e sozinhos representam 9,70% de todas as parcerias internacionais registradas, com 45 ocorrências de coautoria distribuídas entre 23 países parceiros. Reino Unido e China seguem de perto, contribuindo com 8,62% e 7,76% das colaborações, respectivamente. A Alemanha apresenta um nível de conectividade comparável ao do Reino Unido (7,33%), enquanto a Austrália mantém 5,82% do total de interações. Os centros de médio porte incluem Espanha (5,39%) e Países Baixos (4,53%), enquanto Suíça, Suécia e Finlândia contribuem cada com cerca de 3% dos vínculos transfronteiriços. Notavelmente, a ligação diádica mais forte é observada entre Estados Unidos e Canadá, ressaltando uma aliança robusta de pesquisa norte-americana que provavelmente se beneficia de estruturas políticas compartilhadas e instrumentos de financiamento.

Para complementar a análise gráfica, a Tabela 2 lista os dez países mais colaborativos classificados por frequência de coautoria. Coletivamente, essa coorte representa 60,13% de todas as parcerias internacionais identificadas no conjunto de dados. É importante destacar que as 232 relações bilaterais ponderadas de colaboração não correspondem necessariamente a 232 artigos distintos, pois uma publicação com autores de vários países pode gerar múltiplas relações bilaterais; como cada relação envolve dois países, as participações nacionais somam 464, base sobre a qual as percentagens foram calculadas.

Tabela 2. Dez países com maior frequência de coautoria internacional no corpus analisado.

Posição	País	Frequência de coautoria	Participação nas relações internacionais (%)
1	Estados Unidos	45	9,70
2	Reino Unido	40	8,62
3	China	36	7,76
4	Alemanha	34	7,33
5	Austrália	27	5,82
6	Espanha	25	5,39
7	Países Baixos	21	4,53
8	Canadá	20	4,31
9	Suíça	16	3,45
10	Suécia	15	3,23
Total (dez países)	–	279	60,13

Participação calculada sobre 464 participações nacionais (232 relações bilaterais × 2).
Fonte: Dados da pesquisa na base Scopus (Elsevier, 2024), coletados em 2025 e processados no Bibliometrix.

A concentração de atividade dentro desse grupo de elite sugere que o progresso científico na agricultura de mercado de carbono é atualmente impulsionado por uma rede de sistemas de pesquisa de alta capacidade capazes de mobilizar recursos e expertise substanciais, responsáveis por 60,13% das participações nacionais nas relações internacionais de coautoria. No entanto, a presença tanto de economias desenvolvidas quanto emergentes no topo indica crescente inclusão e destaca o potencial para transferência de tecnologia e fortalecimento de capacidades por meio de colaborações Sul–Norte e Sul–Sul. Essa concentração indica um desequilíbrio estrutural nas contribuições para pesquisas, com redes dominantes de coautoria existentes entre os EUA e o Canadá, bem como entre China, Reino Unido e Alemanha. Qualitativamente, essa dominância das nações economicamente desenvolvidas corre o risco de uma desconexão com as realidades dos países em desenvolvimento, onde a agricultura de pequenos produtores é frequentemente uma pedra angular da economia (Khurana *et al.*, 2024).

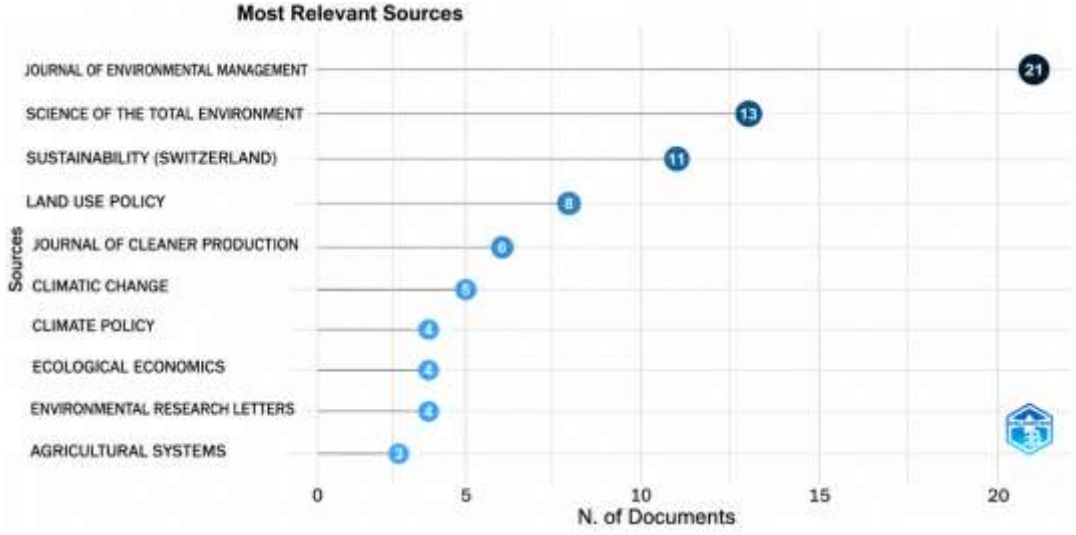
Dessa forma, os resultados indicam que a ampliação da colaboração científica internacional não ocorre necessariamente de maneira homogênea, sendo acompanhada por diferenças expressivas na intensidade e na distribuição territorial das parcerias. A concentração das conexões em países do Norte Global, associada à menor participação relativa de determinadas regiões da América Latina e da África, evidencia oportunidades para o fortalecimento da cooperação científica Sul–Sul e para a constituição de redes mais diversificadas (Anis; Carducci; Ruviaro, 2022).

4.4 PERIÓDICOS MAIS PRODUTIVOS

A Figura 5 oferece uma visão abrangente da disseminação da produção acadêmica sobre o mercado de carbono no contexto da agricultura em uma ampla gama de periódicos científicos. A análise bibliométrica identificou contribuições de 212 periódicos distintos, ressaltando a natureza extensa e multidisciplinar da pesquisa nesse domínio. Entre eles, os dez periódicos mais prolíficos concentram

82 publicações, correspondentes a 24,77% dos 331 artigos analisados, evidenciando a existência de um conjunto de fontes com maior participação na disseminação da produção científica, embora a maior parte dos estudos esteja distribuída entre outros periódicos. Liderando esse grupo está o *Journal of Environmental Management*, que se destaca com 21 publicações (6,34% do total), representando o maior volume entre as fontes analisadas. Seu papel na disseminação de estudos na interseção entre gestão ambiental e estratégias agrícolas de mitigação das mudanças climáticas é, portanto, relevante.

Figura 5. Dez periódicos com maior número de artigos no corpus analisado, classificados pelo número de publicações (Bibliometrix). Tons de azul mais escuros indicam fontes com maior número de publicações. Nota: a figura foi gerada com a versão anterior da base; para Environmental Research Letters a base atualizada registra 7 artigos, e não 4 como exibido.



Nota: a figura foi gerada com a versão anterior da base; para Environmental Research Letters a base atualizada registra 7 artigos, e não 4 como exibido.
Fonte: Elaborado pelos autores, 2025

Em seguida, *Science of the Total Environment* apresenta 13 publicações (3,93%), enquanto *Sustainability* (Switzerland) reúne 11 publicações (3,32%), evidenciando a presença de abordagens relacionadas à sustentabilidade e às interações entre sistemas ambientais e atividades produtivas. O periódico *Land Use Policy* ocupa a quarta posição, com 8 publicações (2,42%), destacando a relevância das discussões sobre governança territorial, práticas agrícolas e políticas de uso da terra. Complementarmente, *Environmental Research Letters* registra 7 publicações (2,11%), seguido por *Journal of Cleaner Production*, com 6 publicações (1,81%), e *Climatic Change*, com 5 publicações (1,51%). Por sua vez, *Climate Policy* e *Ecological Economics* apresentam 4 publicações cada (1,21%), enquanto a décima posição é compartilhada por diferentes periódicos com 3 publicações cada (0,91%).

A presença de periódicos de gestão ambiental, política climática e economia ecológica confirma que o campo é inerentemente interdisciplinar e que a ligação entre a gestão da terra e os mercados de

carbono é tratada tanto por periódicos de ciências ambientais quanto por periódicos de políticas públicas (Stepanyan *et al.*, 2023).

4.5 AUTORES MAIS PRODUTIVOS

Neste estudo, identificamos os dez autores mais prolíficos dentro de nosso corpus de 1.352 pesquisadores para avaliar suas contribuições relativas em termos de volume de publicações e impacto temporal (Tabela 3). Quantificamos a intensidade colaborativa calculando a média de autorias, que gerou uma média de 4,49 colaboradores por artigo, confirmando assim a prevalência de esforços com múltiplos autores ao lado de uma minoria de obras de autor único (8,46%). A partir desse subconjunto, Zhang X. emergiu como o autor mais produtivo, com cinco publicações distribuídas entre 2016 e 2025, seguido por Li J., Mittenzwei K. e Wang Z., com quatro publicações cada. De forma semelhante, Bakam I., Blumberga D., Brummitt C.D., Campbell E.E. e De Cara S. apresentaram três publicações cada, e Edmonds J. é contabilizado pelo Bibliometrix com três publicações, embora a Tabela 3 registre apenas os anos de 2014 e 2015. Para contextualizar melhor esses resultados, incorporamos as taxas anuais de citações, revelando que Brummitt C.D. e Campbell E.E. apresentaram, em 2024, uma média de 18 citações por ano, destacando a repercussão acadêmica recente de suas publicações. Adicionalmente, Edmonds J. apresentou expressivo impacto bibliométrico, com 144 citações acumuladas para sua publicação de 2014, evidenciando a relevância de contribuições anteriores para a consolidação do campo de pesquisa.

Tabela 3. Produção anual e citações médias por ano dos dez autores mais produtivos do corpus.

Autor	Ano	Doc.	Cit./ano	Autor	Ano	Doc.	Cit./ano
Zhang X	2016	1	5,73	Bakam I	2009	1	0,89
	2023	1	2,00		2012	2	3,80
	2024	1	9,33	Blumberga D	2016	1	4,27
	2025	2	2,50		2021	1	0,83
Li J	2014	1	2,85		2024	1	0,33
	2015	1	6,83	Brummitt CD	2021	1	3,83
	2023	1	11,25		2023	1	11,75
	2024	1	2,67		2024	1	18,00
Mittenzwei K	2020	1	0,86	Campbell EE	2021	1	3,83
	2021	1	7,33		2023	1	11,75
	2025	2	5,50		2024	1	18,00
Wang Z	2019	1	0,88	De Cara S	2011	1	5,63
	2024	2	3,33		2021	1	1,50
	2025	1	4,50		2024	1	1,33
				Edmonds J	2014	1	11,08
					2015	1	6,33

Doc. = número de documentos; Cit./ano = citações por ano.
Fonte: Dados da pesquisa na base Scopus (Elsevier, 2024), coletados em 2025 e processados no Bibliometrix.

Padrões temporais de publicação entre esses autores líderes apresentaram variabilidade notável, em vez de uma trajetória de crescimento constante, sugerindo que a atividade de pesquisa pode ser

impulsionada por fatores episódicos como demandas temáticas emergentes ou o início de colaborações direcionadas. A produção dos autores de maior impacto recente concentra-se no MRV de créditos de carbono do solo (Brummitt *et al.*, 2024), e o contexto de pequenos produtores é explorado por muitos autores nesse domínio, como na análise do sistema socioecológico do manejo do carbono do solo por pecuaristas australianos (Amin *et al.*, 2023).

4.6 TENDÊNCIAS TEMÁTICAS, GEOGRÁFICAS E METODOLÓGICAS NA AGRICULTURA FAMILIAR

A leitura temática dos 331 artigos revela que o mercado de carbono, como serviço ecossistêmico, está firmemente estabelecido como um instrumento crítico no enfrentamento das mudanças climáticas, especialmente no setor agrícola. A investigação sobre como esse tema é abordado dentro da comunidade científica exigiu a aplicação de uma estrutura analítica multidimensional, que integra fatores sociais, políticos, ambientais, econômicos e tecnológicos.

A distribuição geográfica da literatura revisada destaca prioridades e abordagens regionais distintas. Na Ásia, a China emerge como um principal polo de pesquisa e implementação de políticas relacionadas ao sequestro de carbono agrícola. Estudos chineses enfatizam o duplo papel do mercado de carbono tanto como estratégia de mitigação climática quanto como uma oportunidade econômica significativa, impulsionando a integração de práticas agrícolas sustentáveis com uma agenda nacional de economia verde (Jin *et al.*, 2024; Xu; Wang, 2024). Em contraste, a pesquisa nos Estados Unidos concentra-se na regulação ambiental e no desenvolvimento de instrumentos financeiros para facilitar a transição para a agricultura de baixo carbono. Esse foco inclui uma análise rigorosa da viabilidade econômica de integrar práticas regenerativas em mercados de carbono regulados e voluntários (Brummitt *et al.*, 2024). Pesquisas europeias, particularmente em países como Alemanha, França, Reino Unido, Espanha e Itália, são predominantemente centradas na implementação de políticas públicas que incentivem a adoção de agricultura regenerativa e tecnologias avançadas de captura de carbono (Plieninger, 2011; Dace *et al.*, 2015; Stepanyan *et al.*, 2023).

No Hemisfério Sul, é evidente o fortalecimento do mercado agrícola de carbono, com países como Brasil, Argentina, Peru e Bolívia emergindo como referências-chave na América Latina (Segnini *et al.*, 2011). Pesquisas nessa região direcionam atenção significativa para a agricultura de pequenos produtores, com foco particular em sistemas agroflorestais e outras práticas sustentáveis que oferecem benefícios duplos de mitigação das mudanças climáticas e maior lucratividade para essa categoria social. O Brasil, por exemplo, está desenvolvendo ativamente mecanismos de compensação para integrar pequenos agricultores de regiões vulneráveis ao mercado de carbono; a modelagem de

domicílios de pequenos produtores na Amazônia indicou que a remuneração pelo carbono pode elevar a renda familiar, desde que os custos de participação sejam baixos (Mello; Hildebrand, 2012). Para Johansson, Andersson e Fischer (2025), embora a agricultura de carbono venha ganhando espaço nas discussões sobre as mudanças climáticas e a sustentabilidade agrícola, ainda existem lacunas na compreensão de como essas práticas podem contribuir para o fortalecimento da agricultura familiar, especialmente no que se refere ao potencial dos solos para o sequestro de carbono e aos desafios relacionados à mensuração e à integridade dos créditos gerados. Nesse sentido, torna-se necessário ampliar as investigações sobre a relação entre o manejo sustentável do solo, a valorização dos serviços ecossistêmicos e as oportunidades de inserção da agricultura familiar no mercado de carbono, considerando as particularidades socioambientais e produtivas dos territórios rurais brasileiros.

De forma semelhante, na África, países como África do Sul, Etiópia, Quênia e Gana estão avançando com iniciativas de compensação de carbono destinadas a expandir a inclusão de pequenos produtores (Thangata; Hildebrand, 2012; Lee *et al.*, 2016; Okoli; Birkenberg, 2024). O compartilhamento de conhecimento e a adaptação das tecnologias de medição, relato e verificação de carbono (MRV) aos contextos locais são fundamentais para formular políticas públicas eficazes que tragam benefícios econômicos diretos aos pequenos agricultores.

Uma tendência metodológica significativa identificada na literatura é a aplicação de modelos biofísicos e econômicos para projetar o potencial dos mercados de carbono na agricultura. O uso de modelos como a Ferramenta de Avaliação do Solo e da Água (SWAT), o Rothamsted Carbon Model (RothC), o DayCent e plataformas proprietárias como a Indigo Ag (Segnini *et al.*, 2011; Ansari *et al.*, 2024; Okoli; Birkenberg, 2024; Singh *et al.*, 2024) demonstrou considerável potencial. No entanto, esta revisão identificou uma lacuna crítica em pesquisa quanto à validação e aplicabilidade desses modelos sofisticados para a escala operacional única e as diversas condições bioeconômicas inerentes aos sistemas agrícolas de pequenos produtores. A escassez de estudos validando esses modelos para produtores de pequena escala destaca uma área crítica para pesquisas futuras, tanto mais porque a comparação de protocolos de créditos de carbono do solo mostra que a escolha entre medição direta e modelagem altera substancialmente a quantidade de créditos emitidos (Oldfield *et al.*, 2022). Segundo Putra *et al.* (2026), apesar do crescente reconhecimento da agricultura de carbono como estratégia de mitigação das mudanças climáticas e promoção da sustentabilidade agrícola, persistem lacunas científicas relacionadas à mensuração, ao monitoramento e à verificação do sequestro de carbono nos solos agrícolas, bem como à integridade ambiental dos créditos de carbono gerados.

A análise quantitativa das abordagens temáticas dentro do corpus de artigos indica uma clara predominância da perspectiva econômica, que representou 48,7% dos estudos. Essa abordagem foca

na integração dos mecanismos de mercado de carbono com as realidades financeiras dos agricultores, postulando créditos de carbono como uma nova fonte de receita (Dace *et al.*, 2015; Tan; Kuebbing, 2023). Complementando isso, a abordagem ambiental (13,2%) concentra-se nos benefícios ecológicos de práticas que restauram as funções dos ecossistemas e promovem a saúde do solo. A forte confluência de pesquisas econômicas e ambientais reflete o imperativo de conciliar a lucratividade da agricultura de pequenos produtores com objetivos mais amplos de sustentabilidade. Além disso, a abordagem multidimensional, que representa 26% da pesquisa, reforça a necessidade de considerar a complexa interação entre dimensões sociais e políticas; as abordagens estritamente social e política correspondem ao restante (12,1%) dos estudos classificados.

O predomínio da perspectiva econômica, contudo, contrasta com a evidência empírica sobre a renda efetivamente gerada: em projetos com pequenos produtores, os pagamentos por família tendem a ser baixos em relação aos custos de transação e de MRV, e os benefícios percebidos derivam sobretudo de cobenefícios agronômicos e do acesso a assistência técnica (Jindal; Kerr; Carter, 2012; Lee *et al.*, 2016; Tang *et al.*, 2016). Nos mercados voluntários de carbono do solo, a heterogeneidade dos protocolos, as exigências de permanência de décadas e a captura de parte da receita por intermediários reduzem a atratividade para pequenas áreas (Wongpiyabovorn; Plastina; Crespi, 2023; Johansson; Andersson; Fischer, 2025), e a distribuição dos benefícios levanta questões de justiça climática ainda pouco tratadas pelo corpus (Moinet, 2026). Esses achados indicam que a dimensão econômica dominante na literatura precisa ser complementada por análises distributivas e institucionais, como as consolidadas na literatura sobre PSA (Börner *et al.*, 2017; Wunder *et al.*, 2020).

4.7 IMPLICAÇÕES PARA POLÍTICAS PÚBLICAS E PARA OS ODS

Do ponto de vista político, os dados sintetizados indicam que o sucesso do mercado de carbono depende de políticas públicas robustas que incentivem práticas agrícolas sustentáveis e a adoção de tecnologias de captura de carbono. O estabelecimento de esquemas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), por exemplo, é identificado na literatura revisada como uma estratégia eficiente para garantir a participação ativa dos pequenos agricultores, fornecendo compensação adequada por sua responsabilidade ambiental; a eficácia desses esquemas, porém, depende de condicionalidade, focalização e adicionalidade bem desenhadas (Börner *et al.*, 2017; Wunder *et al.*, 2020). Uma transição socialmente justa para uma economia de baixo carbono exige que os mecanismos de comércio de carbono levem em conta as realidades sociais, econômicas e políticas dos diversos sistemas agrícolas. As políticas devem ser adaptadas em contextos locais, garantindo uma divisão equitativa de benefícios e minimizando consequências não intencionais, como a consolidação de terras ou o deslocamento de

inquilinos (McAfee, 2012; Muradian *et al.*, 2013). Parcerias com organizações comunitárias podem agilizar o alcance e o monitoramento (Lee *et al.*, 2016). No Brasil, a combinação entre a Política Nacional de PSA, que prioriza a agricultura familiar (Brasil, 2021), e o SBCE, que reconhece créditos voluntários (Brasil, 2024), cria uma janela institucional para desenhar programas de agregação de pequenos produtores com MRV de baixo custo.

Uma dimensão crucial desta análise envolve situar esses achados dentro do quadro dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). A integração da agricultura sustentável com os mercados de carbono apoia diretamente o ODS 13 (Ação Climática) ao mitigar as emissões de GEE e fortalecer a resiliência local (Kyoi; Mori; Matsushita, 2024; Okoli; Birkenberg, 2024). Ao fornecer uma nova fonte de receita, ele também contribui para o ODS 1 (Erradicação da Pobreza) e o ODS 2 (Fome Zero), desde que a intensificação sustentável não comprometa a produção de alimentos, como preconiza a agricultura climaticamente inteligente (Lipper *et al.*, 2014). Além disso, o desenvolvimento de políticas inclusivas que garantam acesso equitativo a esses mercados é essencial para o avanço do ODS 10 (Redução das Desigualdades), empoderando populações rurais vulneráveis. A implementação bem-sucedida desse mercado será, em última instância, determinada pela criação de soluções adaptadas às especificidades locais, respeitando as realidades econômicas e culturais, e garantindo a participação justa e equitativa dos pequenos agricultores.

4.8 LIMITAÇÕES DA REVISÃO E CONTRIBUIÇÃO

Os resultados devem ser interpretados à luz de algumas limitações. Primeiro, o corpus restringe-se a artigos finais publicados em periódicos indexados no Scopus, o que exclui outras bases (Web of Science, SciELO), livros, capítulos, anais, artigos de revisão e a literatura cinza de agências e organizações não governamentais, na qual grande parte da experiência prática com projetos de carbono de pequenos produtores é documentada; o viés em favor de periódicos em língua inglesa tende a subestimar a produção latino-americana e africana sobre agricultura familiar. Segundo, a string de busca é apresentada neste artigo na versão traduzida fornecida pelos autores, e o limite superior do ano de publicação utilizado na atualização de 2025 deve ser conferido para a reprodução exata da busca; o número de registros recuperados antes da triagem e a data de extração não foram registrados, de modo que não foi possível apresentar um fluxograma com contagens por etapa, como recomendado pela declaração PRISMA 2020 (Page *et al.*, 2021). Terceiro, os limiares de frequência, o dicionário de sinônimos e a interpretação dos agrupamentos envolvem decisões analíticas que afetam a composição dos clusters; as métricas de colaboração contam relações bilaterais entre países, não artigos, e as métricas de citação dependem do momento da consulta. Quarto, a contagem de 2025 pode

corresponder a um ano incompleto, e as figuras geradas pelo Bibliometrix a partir da versão anterior da base (Figura 5) apresentam pequenas divergências em relação aos valores atualizados descritos no texto. Por fim, a classificação temática dos documentos mais citados é interpretativa e sua planilha de codificação não acompanha esta versão do artigo.

Apesar dessas restrições, o estudo oferece uma contribuição em três planos. No plano empírico, fornece o primeiro mapeamento bibliométrico, de que se tem notícia, dedicado à interface entre mercados de carbono e agricultura familiar, quantificando a expansão do campo (331 artigos; 60% desde 2020), sua estrutura temática em dez agrupamentos e a concentração da colaboração em dez países (60,13%). No plano metodológico, demonstra a combinação de indicadores bibliométricos com síntese temática qualitativa para identificar não apenas o volume, mas o conteúdo das lacunas — em particular a ausência de validação de modelos de quantificação de carbono (SWAT, RothC, DayCent) para pequenas propriedades. No plano das políticas públicas, articula as evidências internacionais com o marco institucional brasileiro recente, formado pelas Leis nº 14.119/2021 e nº 15.042/2024, oferecendo uma agenda para estudos territoriais que avaliem o potencial dos solos da agricultura familiar como sumidouros de carbono e as condições de inserção desses produtores nos mercados regulado e voluntário.

5 CONCLUSÃO

Esta investigação sobre a interação entre mercados de carbono e agricultura revela um campo de pesquisa dinâmico e em rápida expansão, especialmente no contexto da agricultura de pequenos produtores. A análise bibliométrica e sistemática de 331 artigos confirma uma expansão significativa da produção científica desde os anos 2000, com uma aceleração notável na última década: a produção média passou de 2,2 artigos por ano em 2000–2009 para 32,8 artigos por ano em 2020–2025, e o ano de 2025 concentrou 69 artigos. A estrutura temática do campo, organizada em dez agrupamentos, articula tecnologias de monitoramento, práticas regenerativas de manejo do solo e instrumentos de mercado, enquanto a colaboração internacional concentra-se em dez países responsáveis por 60,13% das relações de coautoria e a disseminação ocorre sobretudo em periódicos de gestão ambiental, política climática e economia ecológica.

As evidências indicam que esses mercados oferecem oportunidades financeiras para pequenos agricultores, mas a realização desse potencial depende de superar barreiras consideráveis à implementação. A pesquisa destaca que a implantação de mecanismos de mercado de carbono em pequena escala é frequentemente dificultada pela complexidade dos protocolos de certificação, infraestrutura local inadequada e acesso insuficiente às tecnologias necessárias. Além disso, a análise

revelou disparidades estruturais na colaboração científica internacional, com nações desenvolvidas dominando a produção de pesquisas e soluções tecnológicas.

A síntese temática identificou uma lacuna crítica de conhecimento sobre a aplicação operacional dos modelos tecnológicos predominantes. Embora ferramentas como a Ferramenta de Avaliação de Solo e Água (SWAT) e o Modelo de Carbono de Rothamsted (RothC) mostrem potencial, há uma necessidade urgente de pesquisas focadas em adaptar e validar esses modelos para as realidades operacionais específicas e as diversas condições biofísicas dos sistemas de produção em pequena escala.

Portanto, este estudo contribui para o avanço do conhecimento ao fornecer uma base teórica e prática para o desenho de políticas públicas mais inclusivas e eficazes. Para reduzir a lacuna entre o potencial do mercado e sua implementação prática, tais políticas devem ser estrategicamente focadas em garantir a acessibilidade e a viabilidade financeira das práticas agrícolas sustentáveis para pequenos produtores. As conclusões limitam-se a artigos indexados no Scopus até 2025 e à leitura temática dos documentos mais citados; estudos futuros devem incorporar outras bases e a literatura cinza, registrar o fluxo de seleção com contagens por etapa e avaliar empiricamente, em territórios da agricultura familiar, o potencial de sequestro de carbono dos solos e os custos de MRV. Ao enfrentar essas barreiras tecnológicas, infraestruturais e sistêmicas, os formuladores de políticas podem promover uma transição justa e eficaz para um setor agrícola de baixo carbono, garantindo que os benefícios da economia do carbono sejam distribuídos de forma equitativa e que a ação climática esteja totalmente alinhada com os mais amplos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é financiado pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) sob o programa Biorecursos, Recursos Hídricos e Sustentabilidade Ambiental na Bahia, por meio do Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente, Convocatória de Propostas 38/2022, Acordo de Cooperação Técnica nº 294/2023 e Acordo de Subvenção nº PPF0003/2023. T.C.P (bolsa #380742/2024-1). Financiamento adicional foi fornecido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) sob a bolsa CNPq/MCTI nº 441271/2023-5 – Presente, passado e futuro da Biodiversidade Semiárida: inventários, monitoramento, impacto das mudanças climáticas e implicações para o uso e conservação de flora, fauna e fungos. R.N.V. e W.J.S.F.R. foram apoiados pelo INCT IN-TREE para Tecnologia em Estudos Interdisciplinares e Transdisciplinares em Ecologia e Evolução (nº 465767/2014-1).

Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), por meio do edital CNPq/MCTI nº 441271/2023-5 – Presente, Passado e Futuro da Biodiversidade do Semiárido: Inventários, Monitoramento, Impactos das Mudanças Climáticas e Implicações para o Uso e Conservação da Flora, Fauna e Fungos. W.J.F.R. foi apoiado por bolsa de produtividade em pesquisa do CNPq (processo nº 314954/2021-0), Projeto Prospecta 4.0 – CNPq (processo nº 407907/2022-0) e pelo projeto 30202010010121001 – CTBIO – FINEP, associada ao Centro Temático de Bioeconomia do Semiárido (UEFS – CTBio-CIMATEC SERTÃO). Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estudos Interdisciplinares e Transdisciplinares em Ecologia e Evolução (INCT IN-TREE), financiado pelo CNPq (408930/2024-1), pela CAPES (88887.195651/2025-00) e pela FAPESP. Financiamento adicional foi fornecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), por meio do programa Bioeconomia, Recursos Hídricos e Sustentabilidade Ambiental na Bahia, no âmbito da Chamada nº 38/2022, Acordo de Cooperação Técnica nº 294/2023 e Termo de Outorga nº PPF0003/2023. Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente (PPGM/UEFS) pelo apoio institucional, bem como ao SENAI CIMATEC pela contribuição no desenvolvimento científico e tecnológico voltado à inovação aplicada. R.N.V. foi apoiado pelo INCT IN-TREE e agradece a bolsa SET-G 30202010010121001 – CTBIO – FINEP, associada ao Centro Temático de Bioeconomia do Semiárido (UEFS – CTBio-CIMATEC SERTÃO), vinculado a Projetos Especiais.

REFERÊNCIAS

AMIN, Md Nurul; LOBRY DE BRUYN, Lisa; HOSSAIN, Md Sarwar *et al.* The social-ecological system of farmers' current soil carbon management in Australian grazing lands. Environmental Management, v. 72, n. 2, p. 294-308, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s00267-023-01801-4.

AMUNDSON, Ronald; BIARDEAU, Léopold. Soil carbon sequestration is an elusive climate mitigation tool. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 115, n. 46, p. 11652-11656, 2018. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.1815901115.

ANIS, Cíntia Ferreira; CARDUCCI, Carla Eloize; RUVIARO, Clandio Favarini. Mercado de carbono agrícola: realidade ou desafio? Multitemas, v. 27, n. 65, p. 163-188, 2022. DOI: https://doi.org/10.20435/multi.v27i65.3396.

ANSARI, Meraj Alam; RAVISANKAR, Natesan; SHAMIM, Mohammad *et al.* Accounting of carbon sequestration and tradeoff under various climatic scenarios in alternative agricultural system: a comprehensive framework toward carbon neutrality. Frontiers in Sustainable Food Systems, v. 8, 1371255, 2024. DOI: https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1371255.

ARIA, Massimo; CUCCURULLO, Corrado. bibliometrix: an R-tool for comprehensive science mapping analysis. Journal of Informetrics, v. 11, n. 4, p. 959-975, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007.

BÖRNER, Jan; BAYLIS, Kathy; CORBERA, Esteve *et al.* The effectiveness of payments for environmental services. World Development, v. 96, p. 359-374, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2017.03.020.

BOSSIO, D. A.; COOK-PATTON, S. C.; ELLIS, P. W. *et al.* The role of soil carbon in natural climate solutions. Nature Sustainability, v. 3, n. 5, p. 391-398, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41893-020-0491-z.

BRASIL. Lei nº 11.326, de 24 de julho de 2006. Estabelece as diretrizes para a formulação da Política Nacional da Agricultura Familiar e Empreendimentos Familiares Rurais. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 25 jul. 2006. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/l11326.htm. Acesso em: 13 nov. 2026.

BRASIL. Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 14 jan. 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14119.htm. Acesso em: 13 nov. 2026.

BRASIL. Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 12 dez. 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l15042.htm. Acesso em: 13 nov. 2026.

BRUMMITT, Charles D.; MATHERS, Cara A.; KEATING, Rebecca Arundale *et al.* Solutions and insights for agricultural monitoring, reporting, and verification (MRV) from three consecutive issuances of soil carbon credits. Journal of Environmental Management, v. 369, 122284, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122284.

CRIPPA, M.; SOLAZZO, E.; GUIZZARDI, D. *et al.* Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. Nature Food, v. 2, n. 3, p. 198-209, 2021. DOI: https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9.

DACE, Elina; MUIZNIECE, Indra; BLUMBERGA, Andra *et al.* Searching for solutions to mitigate greenhouse gas emissions by agricultural policy decisions: application of system dynamics modeling for the case of Latvia. Science of The Total Environment, v. 527-528, p. 80-90, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.088.

DONTHU, Naveen; KUMAR, Satish; MUKHERJEE, Debmalya *et al.* How to conduct a bibliometric analysis: an overview and guidelines. Journal of Business Research, v. 133, p. 285-296, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070.

ECK, Nees Jan van; WALTMAN, Ludo. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. Scientometrics, v. 84, n. 2, p. 523-538, 2010. DOI: https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3.

ELSEVIER. Scopus: content coverage guide. Amsterdam: Elsevier, 2024. Disponível em: https://www.elsevier.com/products/scopus/content. Acesso em: 13 nov. 2026.

GALVAO, Maria Cristiane Barbosa; PLUYE, Pierre; RICARTE, Ivan Luiz Marques. Métodos de pesquisa mistos e revisões de literatura mistas: conceitos, construção e critérios de avaliação. InCID: Revista de Ciência da Informação e Documentação, v. 8, n. 2, p. 4-24, 2017. DOI: https://doi.org/10.11606/issn.2178-2075.v8i2p4-24.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Global warming of 1.5 °C: an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. DOI: https://doi.org/10.1017/9781009157940.

JIN, Boyu; CUI, Claire; WEN, Le *et al.* Regional differences and convergence of agricultural carbon efficiency in China: embodying carbon sink effect. Ecological Indicators, v. 169, 112929, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112929.

JINDAL, Rohit; KERR, John M.; CARTER, Sarah. Reducing poverty through carbon forestry? Impacts of the N'hambita Community Carbon Project in Mozambique. World Development, v. 40, n. 10, p. 2123-2135, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2012.05.003.

JOHANSSON, Emma; ANDERSSON, Elina; FISCHER, Klara. The race for carbon in farmland: global mapping of the emerging voluntary market for soil carbon credits. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, v. 32, n. 7, p. 810-826, 2025. DOI: https://doi.org/10.1080/13504509.2025.2561262.

KHURANA, Ananya; KAJALE, Dilip; CARIAPPA, Adeeth A. G. *et al.* Shaping India's climate future: a perspective on harnessing carbon credits from agriculture. Outlook on Agriculture, v. 53, n. 2, p. 113-130, 2024. DOI: https://doi.org/10.1177/00307270241240778.

KYOI, Shinsuke; MORI, Koichiro; MATSUSHITA, Kyohei. Seeking sustainable efficient global agricultural production with nexus approach. Journal of Cleaner Production, v. 477, 143805, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143805.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science, v. 304, n. 5677, p. 1623-1627, 2004. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1097396.

LEE, Jean; INGALLS, Micah; ERICKSON, Jon D. *et al.* Bridging organizations in agricultural carbon markets and poverty alleviation: an analysis of pro-poor carbon market projects in East Africa. Global Environmental Change, v. 39, p. 98-107, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.04.015.

LIPPER, Leslie; THORNTON, Philip; CAMPBELL, Bruce M. *et al.* Climate-smart agriculture for food security. Nature Climate Change, v. 4, n. 12, p. 1068-1072, 2014. DOI: https://doi.org/10.1038/nclimate2437.

LOWDER, Sarah K.; SÁNCHEZ, Marco V.; BERTINI, Raffaele. Which farms feed the world and has farmland become more concentrated? World Development, v. 142, 105455, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105455.

MCAFEE, Kathleen. Nature in the market-world: ecosystem services and inequality. Development, v. 55, n. 1, p. 25-33, 2012. DOI: https://doi.org/10.1057/dev.2011.105.

MELLO, Ricardo; HILDEBRAND, Peter. Modeling effects of climate change policies on small farmer households in the Amazon Basin, Brazil. Journal of Sustainable Forestry, v. 31, n. 1-2, p. 59-79, 2012. DOI: https://doi.org/10.1080/10549811.2011.565714.

MOINET, Gabriel Y. K. Soil carbon credits fail climate justice in agriculture. Outlook on Agriculture, 00307270261503126, 2026. DOI: https://doi.org/10.1177/00307270261503126.

MURADIAN, R.; ARSEL, M.; PELLEGRINI, L. *et al.* Payments for ecosystem services and the fatal attraction of win-win solutions. Conservation Letters, v. 6, n. 4, p. 274-279, 2013. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1755-263x.2012.00309.x.

NTOMBELA, Sifiso M.; BOHLMANN, Heinrich R.; KALABA, Mmatlou W. Greening the South Africa's economy could benefit the food sector: evidence from a carbon tax policy assessment. Environmental and Resource Economics, v. 74, n. 2, p. 891-910, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s10640-019-00352-9.

OKOLI, Adaugo O.; BIRKENBERG, Athena. Monitoring soil carbon in smallholder carbon projects: insights from Kenya. Climatic Change, v. 177, n. 9, 143, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s10584-024-03796-1.

OLDFIELD, Emily E.; EAGLE, Alison J.; RUBIN, Rachel L. *et al.* Crediting agricultural soil carbon sequestration. Science, v. 375, n. 6586, p. 1222-1225, 2022. DOI: https://doi.org/10.1126/science.abl7991.

PAGE, Matthew J.; MCKENZIE, Joanne E.; BOSSUYT, Patrick M. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, v. 372, n71, 2021. DOI: https://doi.org/10.1136/bmj.n71.

PANDE, Rohini. Can the market in voluntary carbon credits help reduce global emissions in line with Paris Agreement targets? Science, v. 384, n. 6696, eadp5223, 2024. DOI: https://doi.org/10.1126/science.adp5223.

PAUSTIAN, Keith; LEHMANN, Johannes; OGLE, Stephen *et al.* Climate-smart soils. Nature, v. 532, n. 7597, p. 49-57, 2016. DOI: https://doi.org/10.1038/nature17174.

PLIENINGER, Tobias. Capitalizing on the carbon sequestration potential of agroforestry in Germany's agricultural landscapes: realigning the climate change mitigation and landscape conservation agendas. Landscape Research, v. 36, n. 4, p. 435-454, 2011. DOI: https://doi.org/10.1080/01426397.2011.582943.

PURSSELL, Edward; MCCRAE, Niall. How to perform a systematic literature review: a guide for healthcare researchers, practitioners and students. Cham: Springer, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-49672-2.

PUTRA, Yozarwardi Usama; SYAH, Nurhasan; BARLIAN, Eri *et al.* Carbon trading in community-based forest management: a bibliometric mapping of scientific publications from 2000 to 2025. Multidisciplinary Reviews, v. 10, n. 2, 2027097, 2026. DOI: https://doi.org/10.31893/multirev.2027097.

R CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2021. Disponível em: https://www.r-project.org/. Acesso em: 2 dez. 2024.

ROE, Stephanie; STRECK, Charlotte; BEACH, Robert *et al.* Land-based measures to mitigate climate change: potential and feasibility by country. Global Change Biology, v. 27, n. 23, p. 6025-6058, 2021. DOI: https://doi.org/10.1111/gcb.15873.

RSTUDIO TEAM. RStudio: integrated development environment for R. Boston: RStudio, PBC, 2021. Disponível em: https://rstudio.com/. Acesso em: 2 dez. 2024.

SEGNINI, A.; POSADAS, A.; QUIROZ, R. *et al.* Soil carbon stocks and stability across an altitudinal gradient in southern Peru. Journal of Soil and Water Conservation, v. 66, n. 4, p. 213-220, 2011. DOI: https://doi.org/10.2489/jswc.66.4.213.

SHIN, Man Yong; MIAH, Md. Danesh; LEE, Kyeong Hak. Potential contribution of the forestry sector in Bangladesh to carbon sequestration. Journal of Environmental Management, v. 82, n. 2, p. 260-276, 2007. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.12.025.

SILVEIRA, Caroline Soares da; OLIVEIRA, Letícia de. Análise do mercado de carbono no Brasil: histórico e desenvolvimento. Novos Cadernos NAEA, v. 24, n. 3, 2021. DOI: https://doi.org/10.18542/ncn.v24i3.9354.

SINGH, Manoj Kumar; YADAV, Sarwan Kumar; RAJPUT, Bhalendra Singh *et al.* Carbon storage and economic efficiency of fruit-based systems in semi-arid region: a symbiotic approach for sustainable agriculture and climate resilience. Carbon Research, v. 3, n. 1, 33, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s44246-024-00114-3.

SMITH, Pete; SOUSSANA, Jean-François; ANGERS, Denis *et al.* How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. Global Change Biology, v. 26, n. 1, p. 219-241, 2020. DOI: https://doi.org/10.1111/gcb.14815.

STEPANYAN, Davit; HEIDECKE, Claudia; OSTERBURG, Bernhard *et al.* Impacts of national vs European carbon pricing on agriculture. Environmental Research Letters, v. 18, n. 7, 074016, 2023. DOI: https://doi.org/10.1088/1748-9326/acdcac.

TAN, Stanley S. X.; KUEBBING, Sara E. A synthesis of the effect of regenerative agriculture on soil carbon sequestration in Southeast Asian croplands. Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 349, 108450, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108450.

TANG, Kai; KRAGT, Marit E.; HAILU, Atakelty *et al.* Carbon farming economics: what have we learned? Journal of Environmental Management, v. 172, p. 49-57, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.008.

THAMO, Tas; PANNELL, David J. Challenges in developing effective policy for soil carbon sequestration: perspectives on additionality, leakage, and permanence. Climate Policy, v. 16, n. 8, p. 973-992, 2016. DOI: https://doi.org/10.1080/14693062.2015.1075372.

THANGATA, P. H.; HILDEBRAND, P. E. Carbon stock and sequestration potential of agroforestry systems in smallholder agroecosystems of sub-Saharan Africa: mechanisms for 'reducing emissions from deforestation and forest degradation' (REDD+). Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 158, p. 172-183, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.06.007.

VASCONCELOS, Rodrigo N.; FRANCA ROCHA, Washington J. S.; COSTA, Diego P. *et al.* Fire detection with deep learning: a comprehensive review. Land, v. 13, n. 10, 1696, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/land13101696.

WEST, Thales A. P.; WUNDER, Sven; SILLS, Erin O. *et al.* Action needed to make carbon offsets from forest conservation work for climate change mitigation. Science, v. 381, n. 6660, p. 873-877, 2023. DOI: https://doi.org/10.1126/science.ade3535.

WONGPIYABOVORN, Oranuch; PLASTINA, Alejandro; CRESPI, John M. Challenges to voluntary Ag carbon markets. Applied Economic Perspectives and Policy, v. 45, n. 2, p. 1154-1167, 2023. DOI: https://doi.org/10.1002/aepp.13254.

WOOLF, Dominic; LEHMANN, Johannes; OGLE, Stephen *et al.* Greenhouse gas inventory model for biochar additions to soil. Environmental Science & Technology, v. 55, n. 21, p. 14795-14805, 2021. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02425.

WUNDER, Sven; BÖRNER, Jan; EZZINE-DE-BLAS, Driss *et al.* Payments for environmental services: past performance and pending potentials. Annual Review of Resource Economics, v. 12, n. 1, p. 209-234, 2020. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-094206.

XU, Su; WANG, Jun. Study on decarbonization trajectories and policy implications for China: a comparative analysis of carbon peak nations. PLOS ONE, v. 19, n. 8, e0308394, 2024. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0308394.