

ENTRE PRODUÇÃO E MITIGAÇÃO: Interfaces do Agronegócio com o Mercado de Créditos de Carbono

1 INTRODUÇÃO

O mercado de créditos de carbono tem ganhado força como uma ferramenta chave para combater as mudanças climáticas, definindo preços para emissões e promovendo ações de baixa emissão de carbono. No agronegócio, um setor que contribui consideravelmente para as emissões de gases de efeito estufa, participar desse mercado vai além do cumprimento de normas, sendo uma chance de gerar valor financeiro e fortalecer a imagem de produtores e empresas (PETERS-STANLEY; YIN, 2013). Mesmo com sua importância cada vez maior, a ligação entre o mercado de créditos de carbono e o agronegócio ainda é vista de forma isolada, com pesquisas que usam diferentes teorias, métodos e contextos. Essa variedade, embora traga benefícios, torna mais difícil criar um conhecimento sólido que possa guiar tanto a criação de políticas públicas quanto às decisões de empresas do setor (WHITTEMORE; KNAFL, 2005).

Diante disso, é essencial juntar de forma organizada e crítica o que já foi escrito sobre o tema, identificando as principais ideias, formas de análise e resultados já conhecidos, para facilitar a compreensão geral e criar bases para novas pesquisas. Para atender a essa necessidade, este estudo utiliza a Revisão Integrativa de Literatura, um método conhecido por reunir e resumir informações de diferentes tipos de pesquisa, oferecendo uma visão completa e organizada do que já se sabe sobre o assunto (PEROSA et al., 2023).

Dessa forma, esta pesquisa tem como objetivo apresentar uma análise completa do que a ciência já produziu sobre a relação entre o mercado de créditos de carbono e o agronegócio, ajudando a organizar o conhecimento existente e incentivando o desenvolvimento de estudos e práticas mais consistentes na área da sustentabilidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O mercado de créditos de carbono, consolidado pelo Protocolo de Quioto (1997) e fortalecido pelo Acordo de Paris (2015), busca mitigar mudanças climáticas ao internalizar os custos ambientais das emissões de gases de efeito estufa (SIMONE et al., 2017). Vinculado às Contribuições Nacionalmente Determinadas (CNDs), esse instrumento destaca o agronegócio como setor estratégico para a geração de créditos comercializáveis por meio de práticas sustentáveis (HILL et al., 2017).

Os créditos de carbono assumem a natureza de ativos financeiros, com valor determinado pela oferta e demanda, pela confiança no projeto e pelos benefícios associados (SIMONE et al., 2017). A inclusão de uma pequena parcela de futuros de carbono em um portfólio de ações pode proporcionar benefícios de hedge e diversificação, reduzindo o risco geral e aumentando a razão de Sharpe (DEMIRALAY et al., 2022). O potencial financeiro é significativo, visto que, em certos contextos, o valor gerado pelos créditos pode superar o lucro de práticas tradicionais (BELLASSEN; GITZ, 2008). No entanto, a literatura aponta que os retornos financeiros nem sempre são altos o suficiente para motivar todo o potencial de mudança no setor de uso da terra (FLEMING et al., 2019). Para que o potencial seja plenamente aproveitado, é fundamental estabelecer mecanismos de integridade que garantam a adicionalidade, a permanência e a ausência de vazamento de emissões. O agronegócio, embora responsável por aproximadamente um quarto das emissões de GEE, tem se destacado como um fornecedor de créditos de carbono, majoritariamente em mercados voluntários. A participação é viabilizada por meio de práticas de manejo que reduzem emissões, como a diminuição do uso de fertilizantes nitrogenados (BROWN et al., 2017), ou que aumentam o sequestro de carbono

no solo por meio de práticas como o plantio direto e a rotação de culturas (SIMONE et al., 2017; CHEN et al., 2019).

A agricultura de baixo carbono compreende práticas e tecnologias voltadas à redução das emissões líquidas de gases de efeito estufa (GEE) e ao aumento do sequestro de carbono, sem comprometer a produtividade agrícola (BARTAS et al., 2024). Estratégias como manejo sustentável do solo, integração lavoura-pecuária-floresta, plantio direto e sistemas agroflorestais têm mostrado potencial para conciliar produção e mitigação climática (CHAVAN et al., 2024; AMIN et al., 2023). A certificação de baixa emissão, respaldada por medições diretas de GEE, agrega credibilidade e pode ampliar o acesso a mercados especializados. Tais práticas geram valor econômico, como a venda de créditos de carbono (VERSCHUUREN et al., 2024), e benefícios não financeiros, como melhoria da imagem corporativa, conservação da biodiversidade e fortalecimento das comunidades locais (VASCONCELOS; ALMEIDA, 2024).

Apesar do potencial, a inserção do agronegócio no mercado de carbono enfrenta entraves econômicos, regulatórios e técnicos. O baixo retorno financeiro em comparação às commodities agrícolas limita a adoção em larga escala (NELSON; MATZEK, 2016; FLEMING et al., 2019). Requisitos rigorosos de adicionalidade, permanência e monitoramento, bem como altos custos de verificação, tornam os projetos complexos e onerosos (GEROE, 2022; BLACK et al., 2022). Somam-se a esses fatores a falta de conhecimento técnico, a dificuldade de acesso a financiamento e os riscos associados a vazamentos e reversões de carbono, o que evidencia a necessidade de políticas e incentivos mais robustos para viabilizar a participação efetiva do setor.

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa utiliza a Revisão Integrativa de Literatura (RIL) como método, por possibilitar a integração de estudos teóricos e empíricos e fornecer um panorama crítico sobre a relação entre o mercado de crédito de carbono e o agronegócio (WHITTEMORE; KNAFL, 2005). A busca foi realizada na base Scopus, abrangendo o período de 2004 a 2024, com descritores como “carbon credit”, “carbon market”, “carbon pricing”, “agribusiness” e “agriculture”, combinados com operadores booleanos, considerando publicações em inglês, português e espanhol.

Foram incluídos apenas artigos revisados por pares relacionados ao tema, excluindo-se editoriais, cartas, notas técnicas, erratas, atas e capítulos de livros, conforme recomendações metodológicas para revisões integrativas (WHITTEMORE; KNAFL, 2005). A análise seguiu o modelo de Whittemore e Knafl (2005), contemplando extração, categorização e síntese integrativa dos dados, permitindo identificar padrões conceituais, relações entre temas e lacunas relevantes na literatura, favorecendo uma compreensão crítica do campo estudado.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A revisão integrativa da literatura sobre “carbon farming” ou “agricultura de carbono” e mercados de crédito de carbono na agricultura revela um cenário complexo e em evolução, com progressos notáveis em áreas metodológicas e desafios persistentes nos aspectos regulatórios e socioeconômicos. Em relação aos avanços metodológicos e de quantificação, a pesquisa tem se afastado de estimativas simplistas em favor de abordagens mais robustas. O estudo de Hillaoutakis et al. (2024) demonstra o sucesso de um sistema integrado de certificação, combinando medições de GEE em campo, o que proporciona transparência e rigor. Similarmente, Mathers et al. (2023) validaram um modelo computacional para a quantificação de créditos agrícolas em escala nacional, evidenciando o potencial da tecnologia para a

escalabilidade dos projetos. No entanto, o desafio do monitoramento da matéria orgânica do solo permanece, como apontado por Hoogsteen et al. (2021), que ressalta a importância de monitorar fazendas inteiras, e não apenas campos isolados, devido à grande variabilidade, como pode ser visto na Tabela 1, que sintetiza os métodos de quantificação e validação de carbono.

Tabela 1 - Métodos de Quantificação e Validação de Carbono

Estudo	Método de Quantificação/Avaliação	Escala de Aplicação	Principais Resultados	Limitações Identificadas
Hillaoutakis et al. (2024)	Sistema integrado de certificação de baixo carbono com medições de GEE em tempo real.	15 campos-piloto na região mediterrânea.	O sistema demonstrou precisão e confiabilidade, viabilizando a certificação verde	Custos, dados limitados e necessidade de auditorias.
Mathers et al. (2023)	Validação do modelo computacional DayCent-CR.	Território americano	O modelo mostrou alta precisão e robustez para quantificação de créditos agrícolas	Sem limitações informadas
Hoogsteen et al. (2021)	Análise exploratória com monitoramento empírico da matéria orgânica do solo (MOS).	2 fazendas na Holanda, monitorando 14 campos.	As estimativas de estoques de MOS variam conforme fatores de conversão, profundidade e escala de amostragem	As tendências de estoque de MOS diferem conforme campo e profundidade de amostragem
Okoli e Birkenberg (2024)	Revisão de 9 métodos de monitoramento	Pequenos produtores no Quênia.	Sensoriamento remoto carece de transparência; a modelagem reduz custos, porém com menor acurácia	Sem limitações informadas

Outro eixo de análise se concentra nas barreiras e oportunidades nos mercados de carbono, que expõe as falhas de mercado que impedem a adoção generalizada do “carbon farming”. A falta de padronização, transparência e confiança é uma lacuna central, como identificado por Wongpiyabovorn et al. (2022). Em contraste, o modelo regulatório australiano, analisado por Gerpe (2022), é frequentemente citado como um exemplo de sucesso por seu equilíbrio entre incentivos econômicos e rigor regulatório. No entanto, a literatura também alerta para as "consequências não intencionais" dos mercados voluntários, conforme investigado por Wang et al. (2021), que demonstraram como esses mercados podem falhar em promover a expansão de atividades de emissões negativas. A Tabela 2 ilustra essas barreiras e as soluções propostas.

Tabela 2 - Barreiras e Soluções Propostas para os Mercados de Carbono

Estudo(s)	Barreiras Identificadas	Soluções Propostas	Implicações Políticas e Econômicas
Wongpiyabovorn et al. (2022)	Ausência de padrões e verificação; proliferação de selos; metas distantes sem ações imediatas	Clareza nos padrões; confiabilidade nas certificações e simplificação do protocolo	-
Black et al. (2022)	Baixa escalabilidade; incerteza de medição; falta de financiamento; práticas e políticas não harmonizadas	-	-

Vasconcelos e Almeida (2024)	Falta de consenso sobre o conceito de "finanças verdes", gerando risco de <i>greenwashing</i> .	-	-
Niles et al. (2019)	Padrões fortes, certificação confiável; protocolo simplificado	-	-
Gerpe (2022)	-	Modelo australiano equilibra incentivos e regras; útil internacionalmente	-
Wang et al. (2021)	-	-	Risco de rebote em mercados voluntários; programas fortalecem transição

No que diz respeito à viabilidade social e econômica para os agricultores, a revisão aponta para uma grande divergência. Enquanto estudos como o de Nelson e Matzek (2016) concluem que os créditos de carbono competem mal com as commodities agrícolas, a pesquisa de Fleming et al. (2019) destaca a crucial importância dos cobenefícios (ambientais e sociais) para a adoção de práticas sustentáveis. Isso sugere que o valor do “carbon farming” vai além do preço do carbono. Exemplos como os estudos de Lago-Oliveira et al. (2022), Vasconcelos e Almeida (2024), e Tan e Kuebbing (2023) mostram que a integração de práticas regenerativas pode conciliar produtividade, renda e sequestro de carbono. A Tabela 3 detalha a viabilidade econômica e social de diferentes práticas agrícolas.

Tabela 3 - Análise da Viabilidade Econômica e Social

Estudo	Prática Agrícola	Local do Estudo	Ganhos Financeiros/Co benefícios	Principais Desafios	Ganhos/Viabilidade
Lago-Oliveira et al. (2022)	Rotação de culturas de trigo e grão-de-bico	Região de Apulia, Itália	Redução GEE 18%; solo mais fértil; margem bruta +90%	Exige gestão adequada de fertilizantes	Rotação com leguminosa: sustentável e lucrativa
Vasconcelos e Almeida (2024)	Integração da palmeira macaúba em sistemas pecuários	Não especificado	Diversificação de renda; +estoque de carbono; redução da pegada de emissões	Não apresenta	Produção, conservação e mercado de carbono integrados
Nelson e Matzek (2016)	Conversão de terras agrícolas para floresta	Norte da Califórnia	Ganhos com créditos de carbono.	Créditos de carbono pouco competitivos; conversão improvável	Engajamento de agricultores exige terra marginal ou benefícios sociais
Tan e Kuebbing (2023)	Agricultura Regenerativa	Sudeste Asiático	Aumento de carbono no solo	Algumas práticas elevam emissões de CH ₄ e N ₂ O.	Mitigação climática via agricultura regenerativa; avaliar carbono e emissões
Fleming et al. (2019)	Biosequestro e cobenefícios	Austrália	Resiliência e viabilidade econômica em nível de paisagem.	Enfoque financeiro isolado é insuficiente para engajamento	A inclusão de cobenefícios aumenta a adoção de práticas sustentáveis

A análise dos estudos, consolidada nas tabelas, revela um progresso significativo no desenvolvimento de metodologias de quantificação do carbono, que estão se tornando mais robustas e confiáveis. No entanto, esses avanços técnicos contrastam com as incertezas e falhas regulatórias dos mercados de carbono, que ainda não oferecem a segurança e a padronização necessárias para uma adoção em larga escala. Além disso, a questão da viabilidade econômica permanece um ponto central de divergência e uma das principais lacunas de pesquisa. Embora os cobenefícios sociais e ambientais sejam cruciais para a adoção, a competitividade financeira dos créditos de carbono frente às commodities agrícolas continua sendo um obstáculo significativo, exigindo abordagens inovadoras e políticas de suporte para alinhar os incentivos e viabilizar o “carbon farming” como uma estratégia global de mitigação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A interface entre o agronegócio e os créditos de carbono é um campo de pesquisa promissor. Esta revisão integrativa de literatura revela que, embora o “carbon farming” seja uma estratégia promissora para a mitigação climática, sua implementação em larga escala ainda enfrenta desafios consideráveis. O principal avanço reside no desenvolvimento de metodologias mais robustas e confiáveis para a quantificação do carbono, o que aumenta a credibilidade dos projetos. A literatura também destaca uma mudança de paradigma, reconhecendo que os cobenefícios são tão importantes quanto os incentivos financeiros para a adoção das práticas por parte dos agricultores.

Apesar desses avanços, as lacunas de pesquisa persistem. A maior delas é a incerteza quanto à viabilidade econômica em larga escala, já que, em muitos casos, os retornos dos créditos de carbono não são competitivos com a produção de commodities. Há também uma necessidade urgente de estudos que se aprofundem em modelos de negócios e políticas que sejam escaláveis para pequenos agricultores, especialmente em países em desenvolvimento.

Em suma, a literatura fornece uma base sólida para a compreensão do campo, mostrando que a pesquisa está se movendo na direção certa, mas que ainda há um longo caminho a percorrer. Para que o “carbon farming” atinja seu potencial máximo, a colaboração entre formuladores de políticas, pesquisadores e agricultores é essencial, visando a criação de mercados mais transparentes, justos e alinhados com a realidade da produção agrícola global.

6 REFERÊNCIAS

- AMIN, Md Nurul 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.
- BARTZAS, G. et al. Low carbon certification of agricultural production using field GHG measurements. Development of an integrated framework with emphasis on mediterranean products. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 9, p. 100666, 2024.
- BELLASSEN, V.; GITZ, V. The role of avoided deforestation in climate change mitigation: An overview of the international debate. **Forest Policy and Economics**, v. 10, n. 6, p. 386-393, 2008.
- BELLASSEN, V.; GITZ, V. Compensated reduction in Cameroon: Between forest protection, poverty alleviation and climate change mitigation. **Ecological Economics**, v. 66, n. 2-3, p. 541-550, 2008.
- BLACK, H. I. J. et al. What makes an operational farm soil carbon code? Insights from a global comparison of existing soil carbon codes using a structured analytical framework. **Carbon Management**, v. 13, n. 1, p. 554-580, 2022.

BROWN, K. et al. Protocols for measuring greenhouse gas emissions from agricultural activities for carbon offset markets: A review. **Frontiers in Environmental Science**, v. 5, p. 72, 2017.

CHAVAN, S. B. et al. Optimizing planting geometries in eucalyptus-based food production systems for enhanced yield and carbon sequestration. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 8, p. 1386035, 2024.

CHEN, B.; FU, Y.; WU, H.; YAN, J.; WU, P. Effects of straw incorporation on nitrous oxide emissions and carbon sequestration in China: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, v. 651, p. 2806-2815, 2019.

COSTELLO, C. et al. Interested but uncertain: Carbon markets and data sharing among US crop farmers. **Sustainability**, v. 15, n. 6, p. 5073, 2023.

DEMIRALAY, S.; GENCER, H. G.; BAYRACI, S. Carbon credit futures as an emerging asset: Hedging, diversification and downside risks. **Energy Economics**, v. 113, 106196, 2022.

FLEMING, A. et al. Agricultural participation in carbon markets: Lessons from Australia. **Land Use Policy**, v. 89, 2019.

FLEMING, B.; McKAY, S.; BREEN, J. Carbon credits for sustainable land management: A review of the potential and challenges. **Agricultural Systems**, v. 175, p. 1-10, 2019.

GEROE, S. Regulatory Support for Biosequestration Projects in Australia: A Useful Model for Transition to Net-Zero Emissions? **Sriwijaya Law Review**, v. 6, n. 1, p. 1-23, 2022.

NELSON, E.; MATZEK, V. Carbon credits compete poorly with agricultural commodities in an optimized model of land use in Northern California. **Climate Change Economics**, v. 7, n. 4, p. 1650009, 2016.

PEROSA, B.; NEWTON, P.; SILVA, R. F. B. A monitoring, reporting and verification system for low carbon agriculture: A case study from Brazil. **Environmental Science & Policy**, v. 140, p. 286-296, 2023.

PETERS-STANLEY, M.; YIN, D. Maneuvering the Mosaic: State of the Voluntary Carbon Markets 2013. **Washington, DC: Ecosystem Marketplace**, 2013.

SIMONE, M. de et al. Payment for environmental services and the mitigation of greenhouse gas emissions in agriculture: Insights from the literature. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 16, n. 6, p. 1214-1228, 2017.

SINGH, S. K. et al. Developing a framework for computing GHG emission rates for periurban agriculture in Hyderabad, India. **Current Science**, v. 126, n. 6, p. 775-785, 2024.

SOARES, C. B. et al. Revisão integrativa: conceitos e métodos utilizados na enfermagem. **Revista da Escola de Enfermagem da USP**, v. 48, n. 2, p. 335-345, 2014.

VASCONCELOS, G. F.; ALMEIDA, V. Carbon credit and macaúba palm tree: Advancing ESG in green cattle production. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 28, n. 5, e240116, 2024.

VERSCHUUREN, J.; FLEURKE, F.; LEACH, M. C. Integrating agricultural emissions into the European Union emissions trading system: legal design considerations. **Sustainability**, v. 16, n. 12, p. 5091, 2024.

WHITTEMORE, R.; KNAFL, K. The integrative review: updated methodology. **Journal of Advanced Nursing**, v. 52, n. 5, p. 546-553, 2005.