



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba

MARIA LAURA HARADA FERREIRA

**BIOCHAR: ESTADO DA ARTE DO USO AGRÍCOLA NO
CENÁRIO BRASILEIRO**

**Sorocaba/SP
2023**

MARIA LAURA HARADA FERREIRA

**BIOCHAR: ESTADO DA ARTE DO USO AGRÍCOLA NO CENÁRIO
BRASILEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Gerson Araújo de Medeiros

**Sorocaba/SP
2023**

F383b	Ferreira, Maria Laura Harada Biochar : estado da arte do uso agrícola no cenário brasileiro / Maria Laura Harada Ferreira. -- Sorocaba, 2023 33 p. : tabs. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba Orientador: Gerson Araújo de Medeiros 1. Biochar. 2. Agronomia. 3. Resíduos. 4. Solo rural Uso. 5. Agricultura Sustentável. I. Título.
-------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Maria Laura Harada Ferreira

BIOCHAR: estado da arte do uso agrícola no cenário brasileiro

Sorocaba, 07 de junho de 2023

Prof. Dr. Gerson Araújo de Medeiros
Orientador

Trabalho aprovado por meio de parecer, homologado pelo Conselho de Curso em reunião de 07 de junho de 2023

Sorocaba/SP
2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família por ter me incentivado, por ter investido em mim e por ter tornado possível eu realizar o curso de Engenharia Ambiental em Sorocaba. Além de terem tido paciência comigo nesse período de elaboração de TCC durante essa quarentena; Adhemar Ricardo Harada Ferreira, Maria Laurinda de Castro Souza Harada Ferreira, Arnaldo Alves Ferreira Neto e Maria Claudia Harada Ferreira amo vocês e sou grata por tê-los como minha família.

Agradeço ao meu orientador por ter me mostrado o Norte e por ter reservado um tempo da sua rotina atribulada para que eu conseguisse elaborar e finalizar meu TCC;

aos docentes do curso de Engenharia Ambiental da Unesp - Campus de Sorocaba que contribuíram para a minha formação como engenheira e como pessoa;

aos meus amigos que torceram e fizeram com que eu conseguisse focar e produzir no meio do caos dessa pandemia, Leandro Alan Castelucci, Thiago Zafalon Miranda;

às pessoas maravilhosas que tive a sorte de terem escolhido permanecer na minha vida e sempre terem me ajudado quando precisei: Gustavo Gerodo, Larissa Zink Carneiro Meira Bergamaschi, Yuri Nishiyama Bueno Rosa.

à galera da Twitch: chat, moderadores, Cassio Cicero da Silva, Bruno Cezario de Oliveira;

aos meus dois amigos Marcio Jose de Souza Silva e Bruno Magalhães Bonfim por terem me dado a oportunidade de respirar mais tranquila com a minha situação financeira e possibilitar um maior foco na finalização do TCC e na minha construção profissional, gratidão;

à Turma XIII pela união, apesar das diferenças, e pela diversão;

e a todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta para a minha formação e para a elaboração deste trabalho.

RESUMO

Nos últimos anos, o uso intensivo dos solos agrícolas tem levado ao esgotamento de nutrientes e afetado a produtividade das culturas. Somando a este fato, a projeção do crescimento populacional aumenta a necessidade do rendimento das culturas agrícolas para garantir a segurança alimentar. O *biochar* tem atraído a atenção de pesquisadores por ser um material economicamente viável e que melhora a qualidade do solo. Logo, o *biochar* ganhou notoriedade pelos benefícios que ele oferece como ser um ótimo condicionador para o solo. O presente estudo teve por objetivo apresentar uma revisão sobre como o *biochar* originado da pirólise da biomassa de resíduos agrícolas e animais, atua como condicionador e adsorvente, além de evidenciar sua utilização somada com fertilizantes, culturas que demonstraram resultados significativos, o cenário hipotético da sua implementação e seu custo benefício. A revisão de literatura recuperou artigos de periódicos brasileiros disponíveis em bases de dados como Web of Science e Scopus, complementados pela plataforma Google Academy, desde 2009 até 2022. Além disso, foi considerado no escopo de busca relatórios oficiais da República. Pôde-se observar que o *biochar* promove benefícios como condicionador de solo e é viável economicamente como biomassa, no entanto carece de exploração na agricultura brasileira e de comercialização, para viabilização dos custos.

Palavras chaves: biocarvão; custo-benefício; *biochar* no Brasil; redução de resíduos.

ABSTRACT

In recent years, the intensive use of agricultural soils has led to nutrient depletion and affected crop productivity. Adding to this fact, projected population growth increases the need for crop yields to ensure food security. *Biochar* has attracted the attention of researchers because it is an economically viable material that improves soil quality. Soon, *biochar* gained notoriety for the benefits it offers such as being a great soil conditioner. This study aimed to present a review on how *biochar* originated from the pyrolysis of agricultural and animal waste biomass, acts as a conditioner and adsorbent, in addition to showing its use together with fertilizers, cultures that have shown significant results, the hypothetical scenario of its implementation and its cost-effectiveness. The literature review recovered articles from Brazilian journals available in databases such as Web of Science and Scopus, complemented by the Google Academy platform, from 2009 to 2022. In addition, official reports from the Republic were considered in the search scope. It could be observed that *biochar* promotes benefits as a soil conditioner and is economically viable as biomass, however it lacks exploration in Brazilian agriculture and commercialization, to make costs viable.

Keywords: *biochar*; cost-benefits; Brazil biochar; waste reduction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Número de publicações acumuladas sobre <i>biochar</i> , recuperadas nas bases de dados da Web of Science, Scopus e Google Academy, no período de 2009 a 2022.....	13
Quadro 1 – Resultados obtidos para revisão bibliográfica.....	13
Figura 2 – Formas de pirólise e suas respectivas temperaturas e características.....	22
Figura 3 – Diagrama de análises utilizando dados de fertilidade da Terra Preta da Amazonia e solos não-antropogênicos.....	25
Figura 4 – Índice de Dickson e Matéria Seca Total das mudas de maracujá aos 60 dias após plantio.....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diferentes tipos de pirólise, características e seus respectivos rendimentos.....	22
Tabela 2 – Análises químicas das amostras de solo com suas médias comparadas sob análise de teste Tukey ($p < 0,05$).....	24
Tabela 3 – Tipos de tratamentos considerados por Cavalcante <i>et al.</i> (2014) e seus respectivos custos.....	29

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	09
2 OBJETIVO	11
2.1 Objetivos específicos	11
3 METODOLOGIA	12
4 RESULTADOS	13
5 DISCUSSÃO	21
5.1 Biochar	21
5.2 Pirólise	22
5.3 Biochar e propriedades do solo	23
6 LIMITES E DESAFIOS	29
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

A agricultura é uma das principais atividades humanas desde a antiguidade, pois permitiu o cultivo de alimentos, reduzindo o esforço necessário para o seu acesso e sedentarizando os que a praticavam. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) as culturas com maior valor de produção, em 2020, foram a soja (R\$ 169 bilhões), milho em grão (R\$ 74 bilhões), cana-de-açúcar (R\$ 61 bilhões) e café (R\$ 27 bilhões). Tais cultivos ocupam extensas áreas agrícolas e utilizam intensamente nutrientes, podendo causar o esgotamento do solo (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2021).

A energia advinda de biomassa tem recebido crescente interesse devido à sua disponibilidade a nível mundial (PATEL, 2014) Neste cenário, a busca por uma resposta para a recuperação de nutrientes do solo levou alguns estudiosos à conhecida Terra Preta de Índio (TPI), encontrada na Amazônia. A TPI, conhecida também como Terra Preta Arqueológica (TPA), ou simplesmente Terra Preta (TP). Tais solos apresentam uma fertilidade notoriamente superior à grande maioria daqueles típicos da região Amazônica (SOARES, 2011). A partir de pesquisas sobre esses solos tornou-se possível chegar à produção do *biochar*, o qual se assemelha à TPI, por conta da alta fertilidade e o alto conteúdo de carbono estável (de origem pirogênica) em sua fração orgânica, modelo este também adequado ao sequestro de carbono (MAIA, 2010b).

O *biochar* é um produto rico em carbono obtido quando a biomassa (madeira, esterco ou folhas) é decomposta termoquimicamente em um ambiente com suprimentos limitados de oxigênio e em temperaturas abaixo de 700°C (LEHMANN *et al.*, 2009). Esse processo se espelha na produção de carvão, uma das tecnologias industriais mais antigas desenvolvidas pela humanidade (HARRIS, 1999). O *biochar* tem por objetivo ser aplicado ao solo para aumentar a produtividade agrícola, pelo armazenamento de carbono e filtração da percolação da água do solo, enquanto o carvão tem fins energéticos. Essa matéria prima é considerada barata e está constantemente disponível em abundância (LEHMANN, 2007).

Dentre os estudos realizados sobre a relação do *biochar* com o ambiente, Maia (2010b) detectou que o biocarvão é um eficiente sequestrador de carbono. Segundo Rezende *et al.* (2011), o *biochar* apresenta estrutura interna inerte, o qual faz preservar (sequestrar) carbono no solo por até mesmo milhares de anos, enquanto a sua estrutura periférica reativa (funcionalizada) atua como a matéria orgânica natural do ambiente. Maia (2010b) observou que o *biochar* utilizado no solo promove alterações químicas e biológicas em sua estrutura original, mesmo sendo considerado um material praticamente inerte. Esse material gera grupos

funcionais iônicos, que aumentam sua importância no complexo de troca iônica do solo. Além disso, Rezende *et al.* (2011) detectou que o *biochar* promove a estruturação do solo pelas suas ligações químicas com estruturas macromoleculares inorgânicas

Desde 1815 foi relatado que o pó de carvão afeta de modo positivo na vegetação, todavia, somente nas décadas anteriores a 2010 iniciaram os estudos sobre a influência do *biochar* na germinação de sementes (DOMINGUES, 2015; NÓBREGA, 2011). Nestes estudos foram relatados benefícios para a fertilidade do solo como, por exemplo, a mudança da resposta do solo à água, arejamento, agregação, no processo da preparação solo para cultivo, a permeabilidade e a elasticidade, assim como a resposta a mudanças de temperaturas e sua capacidade em reter cátions, comprovando assim os possíveis benefícios que o *biochar* oferece (NÓBREGA, 2011)

Portanto, a substituição dos fertilizantes químicos por *biochar* pode contribuir para o sequestro de carbono, tornando-se uma alternativa para a redução dos gases de efeito estufa (GEEs) originados pela agricultura. A agricultura tem elevado potencial para interferir nas mudanças climáticas, seja pela emissão de GEEs nos processos de preparo do solo e adubação química, ou pela mudança no uso e ocupação do espaço físico. Dessa forma, o uso do *biochar* aparece como uma alternativa potencial para fixação do dióxido de carbono no solo a fim de mitigar os impactos desse gás à atmosfera (MAIA, 2010a).

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão de literatura sobre a utilização do *biochar* gerado através da pirólise da biomassa de resíduos agropecuários, e seu potencial de aplicação como condicionador e adsorvente de poluentes orgânicos no solo, avaliando aspectos econômicos. A abrangência geográfica da revisão incluiu somente trabalhos desenvolvidos no Brasil, de 2009 a 2022, através de periódicos disponíveis em bases de dados acadêmica, Web of Science, SciELO e Scopus complementados pela plataforma Google Academy.

2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos envolveram analisar estudos sobre benefícios do *biochar* na agricultura e a possibilidade junto da viabilidade da implementação do *biochar* no cenário brasileiro. Com isso, através da viabilidade, buscou-se entender o custo-benefício da utilização do *biochar*.

3 METODOLOGIA

Foi realizado um levantamento bibliográfico de diversas fontes de pesquisas (teses e dissertações, artigos publicados em periódicos científicos revisados por pares), tanto brasileiras quanto estrangeiras. Este levantamento foi realizado nos bancos de dados *Google Academy*, *Web of Science*, Scopus, SciELO, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) e de livros com temas pertinentes ao tema.

As palavras de busca que utilizadas para a obtenção de material para o estudo foram: *biocarvão/biochar*, *custo-benefício/cost-benefits*, *biochar no Brasil/Brazil biochar*, *redução de resíduos/waste reduction*. Os termos foram utilizados com uso de operadores booleanos como E, OU, AND, OR. Ao todo, a pesquisa bibliográfica englobou o período de janeiro de 2009 até setembro de 2022. Para selecionar a base bibliográfica relevante, foram selecionados artigos que mencionassem aspectos comuns ao Brasil: agricultura, frutas e grãos. Em seguida, foi evitado teses e dissertações e selecionado um artigo por ano para as considerações deste estudo.

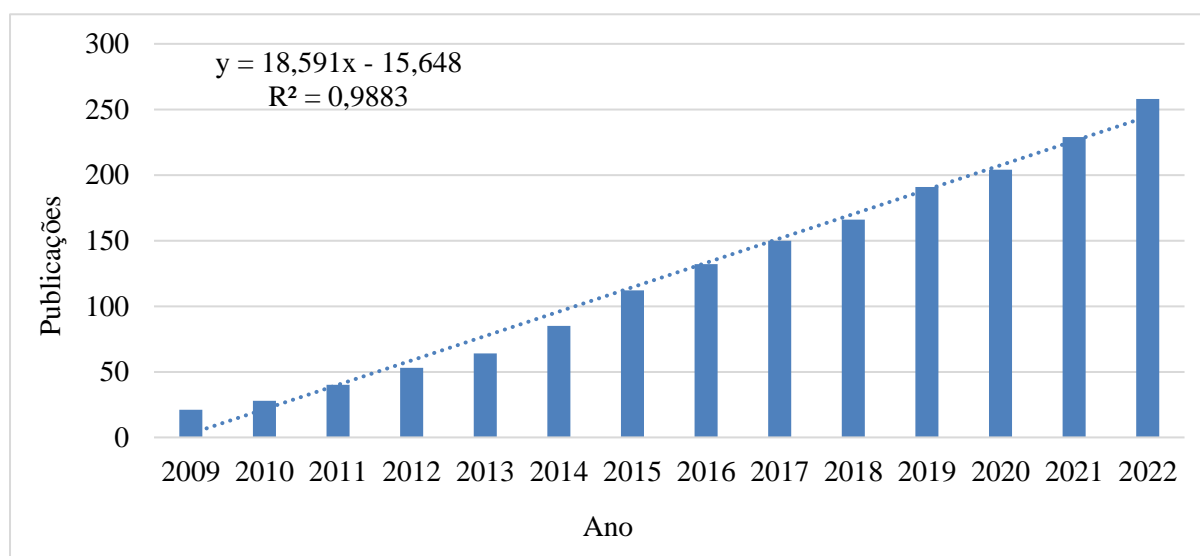
4 RESULTADOS

A partir da metodologia de busca definida através da palavra *biochar* foram encontrados 258 artigos brasileiros, conforme demonstrado na Figura 1. Quando o termo foi associado a custo-benefício, 360 resultados foram obtidos. Além destes, *Brazil biochar* gerou 486 resultados. Na Figura 1 pode-se visualizar uma tendência linear de crescimento nas publicações sobre *biochar* no contexto global, demonstrando um interesse pelas aplicações desse material.

Diante desse panorama e dos critérios de pesquisa aplicados, uma triagem foi realizada para os 14 artigos compilados na Quadro 1. Esta triagem foi realizada a partir dos critérios:

- Um artigo por ano, do período de busca considerado.
- Temáticas relacionadas a agricultura brasileira e/ou;
- Resultados da aplicação do *biochar* no solo
- Foi evitado Teses e Dissertações, porém não foi critério de exclusão;

Figura 1 – Número de publicações acumuladas sobre *biochar*, recuperadas nas bases de dados da Web of Science, Scopus e Google Academy, no período de 2009 a 2022.



Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 1 – Resultados obtidos para revisão bibliográfica

Autor (es) e ano	Fonte	Objetivo	Metodologia	Conclusões
Alho <i>et al.</i> , 2009	Anais Encontro Brasileiro De Substâncias Húmicas	Verificar se o <i>biochar</i> pode ser uma alternativa com potencial para mitigar as emissões de N ₂ O provenientes do solo.	Os tratamentos foram equivalentes a zero, 3, 6 e 9 Mg ha ⁻¹ de <i>biochar</i> (carvão vegetal comercial) incorporado ao	O <i>biochar</i> pode ser uma alternativa com potencial para mitigar as emissões de N ₂ O provenientes do solo, e indicou

			<p>solo. Após 7 dias de repouso os tratamentos receberam o equivalente a 100 kg de N ha⁻¹ (ureia) para estimular a desnitrificação. As amostragens para medição dos fluxos de N₂O foram realizadas todos os dias durante 17 dias.</p>	<p>que doses acima de 6 Mg ha⁻¹ trazem efeitos positivos.</p>
<p>Carmo <i>et al.</i>, 2010</p>	<p>Anais II Workshop Internacional sobre Clima e Recursos Naturais nos Países de Língua Portuguesa</p>	<p>Avaliar o efeito de diferentes doses de carvão vegetal extraído de eucalipto (<i>Eucalyptus sp.</i>) em combinação com adubo mineral sobre a concentração de nutrientes, teor de matéria orgânica do solo e pH</p>	<p>O delineamento experimental foi de quatro blocos semeados com feijão (<i>Phaseolus vulgaris L.</i>), com quatro doses de carvão e quatro doses de adubo mineral. O carvão vegetal de eucalipto foi incorporado ao solo na camada e dosagens específicas, bem como o adubo mineral. O Nitrogênio foi aplicado de forma parcelada, sendo uma aplicação na semeadura, e outra após 20 dias desta. Realizou-se quatro coletas de solo e foram avaliadas as concentrações dos seguintes elementos no solo: Ca, Mg, Al, H + Al, P, K, Cu, Zn, Fe, Mn, Matéria</p>	<p>Houve resposta positiva significativa para o elemento K em que a dosagem de 16 t/ha de carvão promoveu maiores concentrações deste. O Al teve redução na concentração no solo para o tratamento de 16 t/ha de carvão vegetal.</p>

			Orgânica e pH. A análise foi feita através de dados estatísticos.	
Maia, Madari, Novotny, 2011	Capítulo de Livro	Abordar uma visão geral sobre as pesquisas realizadas no Brasil sobre a tecnologia <i>biochar</i> para o solo	Revisão bibliográfica	Dentre os desafios mais importantes para aplicação de <i>biochar</i> no Brasil, está o de encontrar técnicas (fontes, parâmetros de pirólise e aplicação) adaptadas ao bioma Cerrado que experimenta períodos secos acentuados frequentemente, períodos secos curtos, mas limitantes dentro da estação chuvosa e se caracteriza por sistemas de produção específicos
Petter, Madari, 2012	Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Periódico científico)	Demonstrar a estabilidade do <i>biochar</i> no solo e a contribuição deste para redução de emissão de gases de efeito estufa	Revisão bibliográfica	A tecnologia de usar o <i>biochar</i> como condicionador de solo no Cerrado é uma alternativa de futuro promissora para melhorar propriedades do solo e a produção de culturas como a soja e o arroz de forma sustentável.
Morales <i>et al.</i> , 2013	Soil Use and Management (Periódico científico)	Investigar as propriedades de absorção de fósforo de vários <i>biochars</i> lentos e um <i>biochar</i> de pirólise rápida e a	Dois estudos individuais foram combinados a fim de tratar diferentes aspectos de	Há uma diversidade de fósforo que pode ser esperada quando o <i>biochar</i> é usado no solo e sugere

		determinar como um <i>biochar</i> de pirólise rápida influencia essas propriedades em um solo tropical degradado.	absorção sob a influência de diferentes <i>biochars</i> .	o potencial para desenvolver <i>biochars</i> com propriedades que atendam a objetivos específicos.
Cavalcante <i>et al.</i> , 2014	Anais Semana Acadêmica SINOP/2014	Identificar os custos econômicos do uso do biocarvão como condicionador de solo descrevendo de forma detalhada os custos da utilização do biocarvão na fase de plantio das mudas de <i>Tectona grandis</i> (Teca).	Houve a identificação dos custos de implantação do experimento utilizando o biocarvão, coleta de dados e fase de campo com 6 tratamentos. Os tratamentos foram: mudas sem biocarvão + testemunha (Mst); mudas com biocarvão ativado + testemunha (Mat); mudas sem o biocarvão ativado + biocarvão ativado no solo (MsBa); mudas com biocarvão ativado + biocarvão ativado no solo (MaBa); mudas sem biocarvão ativado + biocarvão não ativado no solo (MsBn); mudas com biocarvão ativado + biocarvão não ativado no solo (MaBn)	A diferença nos custos para cada tratamento está diretamente relacionada aos custos de processamento do biocarvão (frete + industrialização), a quantidade aplicada (se ativado ou não ativado) e operação de aplicação no solo
Rezende <i>et al.</i> , 2015	Anais Encontro Brasileiro de Substâncias Húmicas	Apresentar os resultados do crescimento das mudas de maracujá quando cultivadas em substrato condicionado	O experimento foi conduzido por 60 dias e, após esse período, mediu-se a altura das mudas, diâmetro do coleto e fitomassa seca.	Os substratos com <i>biochar</i> ativado apresentaram os melhores resultados quando comparados aos demais

		com doses de <i>biochar</i>		tratamentos.
Alves <i>et al.</i> , 2016	Agrarian Academy (Periódico científico)	Discutir sobre as diferentes estratégias de fitorremediação e vermirremediação de solos contaminados com pesticidas e as respectivas vantagens e limitações de cada uma dessas biotecnologias	Revisão bibliográfica	Observou-se que as biotecnologias apresentadas apresentam vantagens econômicas e ambientais em comparação com os métodos físicos e químicos, porém apresentam limitações que precisam ser superadas através de pesquisa científica e ensaios em escala de laboratório, piloto e campo.
Veiga <i>et al.</i> , 2017	Revista Cerne (Periódico Científico)	Analisar diferentes biomassas, caracterizando-as como potenciais para produção de biocarvões	Foram utilizadas madeiras de <i>Eucalyptus urophylla</i> e <i>Corymbia citriodora</i> e cascas de café como <i>biochars</i> , e feitos estudos químicos para análise do solo.	De forma geral, todas as biomassas apresentaram potencial para serem utilizadas na produção de <i>biochar</i> .
Batista, 2018	Tese (Doutorado em Química) – Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná	Propor o uso de condicionadores de solo derivados de resíduos agrícolas e industriais para melhorar a capacidade de retenção de água do solo e diminuir a toxicidade de metais em solos contaminados.	Diferentes <i>biochars</i> foram preparados por pirólise a baixa temperatura e condições controladas. Foram utilizadas diferentes biomassas em dois solos do nordeste brasileiro.	O uso de <i>biochars</i> pode contribuir para aliviar o estresse hídrico em regiões áridas do nordeste brasileiro.
Pereira, 2019	Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental para o	Avaliar o potencial do biocarvão, produzido a partir de matérias-primas regionais,	Para avaliar o efeito do biocarvão sobre a produção de biomassa do milho foi	Os biocarvões oriundo do resíduo de processamento de uva e resíduo de poda de

	Semiárido) – Universidade de Pernambuco	como condicionador do solo, a fim de reduzir os efeitos das limitações edafoclimáticas e garantir a produtividade em sistemas de produção de milho dependentes de chuva no semiárido brasileiro.	realizado um experimento em vasos, em delineamento ao acaso, com quatro repetições. Foram utilizados três tipos de biocarvão (resíduo de poda de mangueira, resíduo de processamento de uva e carvão vegetal comercial), que foram produzidos em forno de alvenaria, e posteriormente caracterizados quimicamente e aplicados em cinco doses (0,5; 1; 5; 10 Mg ha- 1).	mangueira apresentaram o melhor desempenho dentre as fontes avaliadas tanto para atributos químicos do solo quanto para o rendimento de biomassa aérea do milho.
Sato <i>et al.</i> , 2020	Process Safety and Environmental Protection (Periódico científico)	Avaliar o uso potencial do biocarvão de semente de açaí como condicionador de solo.	O <i>biochar</i> foi produzido a partir de sementes residuais em forno artesanal, incorporado a dois solos de diferentes texturas e depois compactado em anéis volumétricos com prensa hidráulica. As amostras foram mantidas em casa de vegetação por um período de incubação de 270 dias. Em seguida, as amostras foram avaliadas quanto aos atributos físicos e	O <i>biochar</i> aumentou os teores de fósforo, potássio e magnésio e reduziu o teor de alumínio, o que se refletiu em aumento da saturação por bases e redução da saturação de alumínio.

			químicos do solo.	
Batista, Gomes, 2021	Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais (Periódico científico)	Abordar questões relacionadas à pirólise, com foco em resíduos de biomassa agroflorestal como matéria-prima, no biocarvão como um dos produtos da pirólise que apresenta potencial adicional de aplicações em tecnologias ambientais e apresentar experiências brasileiras.	Revisão bibliográfica	Foi notada necessidade de escalonamento, com foco nas aplicações do <i>biochar</i> de relevância ambiental que no Brasil ainda são conduzidos principalmente em escala laboratorial e piloto.
Arias, 2022	Dissertação (Mestrado em Agroecologia e Desenvolvimento Rural) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos	Compreender a relação do uso do <i>biochar</i> no contexto da agroecologia brasileira	Revisão bibliográfica	Como vantagens ambientais, o <i>biochar</i> contribui para o aumento da produtividade reduzindo os impactos aos recursos naturais por melhorar os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, além de contribuir para a redução do volume de resíduos agropecuários gerados, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa. Em relação aos benefícios sociais e econômicos, destaca-se a maior autonomia dos agricultores com relação ao mercado dos fertilizantes,

				redução nos custos de produção e a geração de renda extra com a comercialização do produto final.
--	--	--	--	---------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Elaborado pela autora.

5 DISCUSSÃO

5.1 Biochar

Morales *et al.* (2013) definiram o *biochar* como sendo um material orgânico mal definido, com alto potencial de alteração do solo, como aumento de fertilidade e relações hídricas. A formulação química, segundo os autores, é mal definida por causa da alta variabilidade de propriedades ligadas à sua formação: fonte de matéria-prima, tamanho das partículas, temperatura, pirólise e outros fatores. Uma dessas características químicas é reações de sorção/dessorção de *biochar* com adição externa fósforo (P). Em solos temperados tropicais, a biodisponibilidade de P é um fator importante controle da produção agrícola porque é restringido por constituintes do solo fixadores de P, principalmente Fe e Al. Por esse motivo, realizaram dois estudos individuais e combinados a fim de tratar com diferentes aspectos de sorção/dessorção sob influência do *biochar*. O primeiro estudo se concentrou em diferentes *biochars* feitos a partir da madeira de três espécies de árvores da região amazônica. Os experimentos 1 e 2 investigaram o P características de sorção/dessorção do biocarvão. O segundo estudo (Experimentos 3 e 4) usou uma pirólise rápida *biochar* adicionado a um solo tropical degradado para investigar como este material influenciou a sorção/dessorção de P em um solo/complexo de *biochar*. Em um caso estudado, um *biochar* de pirólise rápida, adicionado a um solo degradado, reduziu a capacidade de fixação de P de um solo tropical degradado. Em outro caso, biocarvões de pirólise lenta tiveram efeitos diferenciais na sorção de P, sugerindo que eles podem ser úteis para manejar o P do solo de forma diferente no mesmo solo, ou ser usado preferencialmente em diferentes solos para adquirir o suprimento de P desejado benefícios.

Veiga *et al.* (2017) procuraram analisar diferentes biomassas, caracterizando-as como potenciais para produção de *biochars*. Foram utilizadas madeiras de *Eucalyptus urophylla* e *Corymbia citriodora* e cascas de café. As biomassas foram moídas e peneiradas e, em seguida, armazenadas sob condições de temperatura e umidade controlada. Posteriormente realizou-se a caracterização dos materiais, por meio de análise química, química imediata, elementar (CHNS-O), térmica (TGA e DTA) e de espectroscopia vibracional na região do infravermelho (FTIR). Em suma, todas as biomassas apresentaram potencial para serem utilizadas na produção de biocarvão, no entanto, a casca de café apresentou maiores teores de lignina, extrativos, cinzas e carbono fixo, o que contribuiu para que a mesma apresentasse maior potencial de utilização como condicionador de solos. Na análise de FTIR, observou-se a presença de bandas referentes aos grupos químicos recalcitrantes, como os carboxílicos e

fenólicos nos espectros de todas as biomassas. O perfil dos termogramas de *C. citriodora* e de *E. urophylla* foram semelhantes entre si e diferentes da casca de café, que apresentou maior estabilidade térmica.

5.2 Pirólise

De acordo com Batista (2018) existem três tipos de pirólises: A) a pirólise onde o processo ocorre rapidamente e pode-se observar um maior rendimento de produtos líquidos; B) a pirólise lenta, conhecida também como carbonização, onde o rendimento predominante será de um produto sólido; e C) a gaseificação, cujo processo resulta em grandes quantidades de produtos gasosos (Tabela 1). A pirólise degrada de forma térmica o material orgânico a partir da ausência parcial ou total de um agente oxidante ou em um ambiente onde a presença de oxigênio consegue impedir a gaseificação do material, além disso ela ocorre a uma temperatura entre 400 ° C até ao começo do sistema de gaseificação.

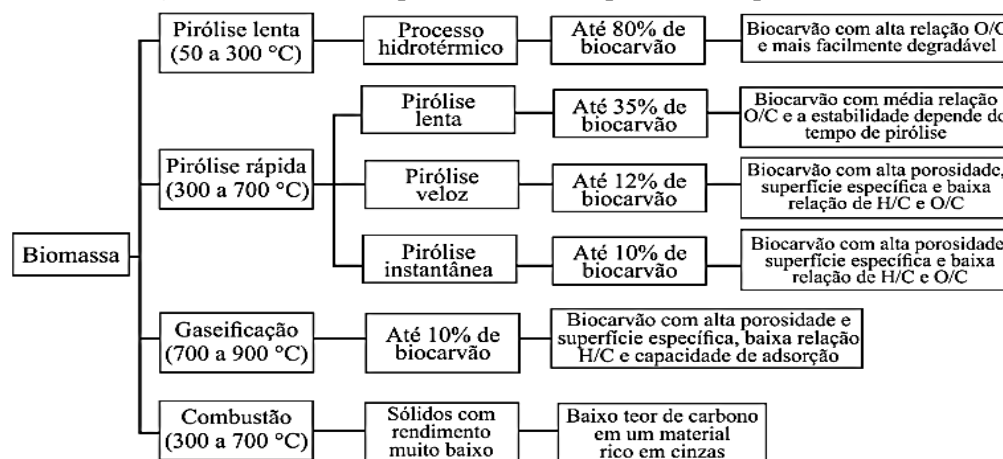
Tabela 1 – Diferentes tipos de pirólise, características e seus respectivos rendimentos.

Tipos de Pirólise	Características de Produção	Rendimento (%)		
		Líquido	Carvão	Gás
Pirólise rápida	Temperatura moderada ~500°C curtos tempos de residência dos vapores e biomassa (<2s)	75	12	13
Carbonização ou pirólise lenta	Baixas temperaturas (400 – 450°C) tempo de residência longo (dias)	30	35	35
Gaseificação	Altas temperaturas (<750°C), longo período de residência	5	10	85

Fonte: Bridgwater (2003) apud Batista (2018).

Diante destes três processos térmicos, a melhor opção para se obter o *biochar* a partir de biomassas é através da pirólise lenta. Segundo Pereira (2019), é essencial que a pirólise lenta tenha uma taxa de aquecimento em torno de 80°C.min⁻¹ e uma temperatura entre 350 a 750°C (Figura 2).

Figura 2 – Formas de pirólise e suas respectivas temperaturas e características.



Fonte: Novotny (2015) apud Pereira (2019)

O processo de pirólise possui uma grande importância, pois é ele quem define a estabilidade do *biochar*. Segundo Maia (2010b), a estabilidade do *biochar* é de fundamental importância para o seu uso como ferramenta de manejo ambiental, citando duas razões. A primeira refere-se à estabilidade, a qual define o tempo para o carbono (C) contido no *biochar* permanecer sequestrado no solo e por quanto tempo pode influenciar as emissões de gases de efeito estufa vindos da pedosfera, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. A segunda está relacionada à estabilidade que determinará por quanto tempo o *biochar* beneficiará a qualidade do solo e elevará a capacidade de armazenamento de água.

Portanto, o *biochar* precisa ser de estabilidade significativamente maior no ambiente do que outra fonte de matéria orgânica, de modo a estender a duração destes benefícios (LEHMANN *et al.*, 2009).

5.3 Biochar e propriedades do solo

Corroborando Lehmann (2007), Alho *et al.* (2009) procuraram verificar se de fato o uso do *biochar* no solo poderia ser benéfico para mitigar as emissões de N₂O (óxido nitroso) provenientes do solo. Os autores definiram este gás como objetivo, uma vez que é um dos componentes que contribuem para o efeito estufa, e compostos a base de nitrogênio compõem os principais fertilizantes no meio da agricultura. Com isso, por meio da Embrapa Agrobiologia, o estudo foi conduzido com uso de porções de solo com delineamento experimental ao acaso, baseado em repetições e dosagens diferentes de *biochar* – neste caso, utilizado o carvão vegetal comercial. Alguns resultados obtidos chegaram à redução de 52% nos totais emitidos, indicando efetivo efeito mitigador das emissões de N₂O pela aplicação de *biochar*.

Ainda no mesmo contexto, Carmo *et al.* (2010) também estudaram efeitos de mitigação de gases com impacto no efeito estufa. Para tal estudo consideraram solo de Cerrado pois, além de ser o segundo maior bioma brasileiro, está presente em uma região do país que é responsável por mais de 40% da produção nacional de soja e carne, cerca de 20% do arroz, milho e café e 10% do feijão, mandioca e cana-de-açúcar. O *biochar* utilizado para os experimentos foi advindo de eucalipto (*Eucalyptus sp.*), aplicado em parcelas experimentais de solo, e avaliadas concentrações dos elementos Ca, Mg, Al, H + Al, P, K, Cu, Zn, Fe, Mn, Matéria Orgânica e pH. Os resultados dos estudos, conforme demonstrado na Tabela 2, indica redução do composto Al e aumento do elemento K, principalmente devido a composição do *biochar* utilizado. O primeiro, justificado pela presença de carbono fenólico que é altamente instável e possui um radical livre onde o Al se liga, resultando na diminuição significativa em sua

concentração. Já o segundo devido a presença de cinzas, rica em potássio. Os benefícios dessas alterações envolvem diminuição da acidez do solo, melhor desenvolvimento do feijoeiro comum, minimização dos efeitos negativos de deficiências hídricas.

Tabela 2 – Análises químicas das amostras de solo com suas médias comparadas sob análise de teste Tukey ($p < 0,05$)

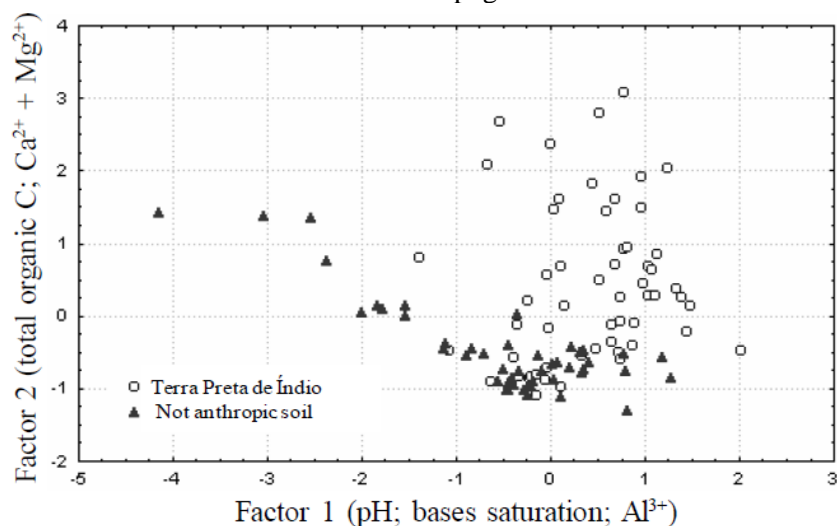
Tratamentos	pH	Ca (mmolc dm ⁻³)	Mg (mmolc dm ⁻³)	Al (mmolc dm ⁻³)	H+Al (mmolc dm ⁻³)	P (mgdm ⁻³)	K (mgdm ⁻³)	M.O. (g dm ⁻³)
Carvão								
Carvão 0 Mg ha⁻¹	5,1 a	13,3 a	3,8 a	3,7 a	63,1 a	33,9 a	107 b	16,4 a
Carvão 16 Mg ha⁻¹	5,1 a	12,1 a	3,4 a	2,8 b	62,1 a	32,7 a	132 a	16,4 a
Nitrogênio								
N 0 kg ha⁻¹	5,2 a	15,0 a	3,8 a	3,3 a	59,2 b	28,4 b	119 a	16,5 a
N 16 kg ha⁻¹	5,0 b	10,9 b	3,5 a	3,2 a	65,2 a	37,0 a	120 a	16,3 a

*Em cada coluna, médias globais dos pares de tratamento seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey aplicado a 0,05 de probabilidade.

Fonte: Carmo *et al.* (2010)

Nesse sentido, Petter e Madari (2012) reuniram estudos com objetivo de demonstrar a estabilidade do *biochar* e as potenciais contribuições para redução de emissão de gases de efeito estufa. No levantamento realizado, observaram que o Brasil é o maior produtor de carvão vegetal representando mais de 35% do total mundial de produção, majoritariamente vinda de eucalipto (*Eucalyptus sp.*). Existem tecnologias para que esse volume de produção agregue menos impacto, sendo capazes de recuperar até 50% de subprodutos da carbonização sob a forma de gases condensáveis, minimizando a poluição ambiental. Um destes, um produto da carbonização da biomassa lingo-celulósica de oxigênio (O₂) controlado, deficiente e relativamente baixo (< 700°C) temperatura ambiente é o referido *biochar*. A Figura 3 mostra que a fertilidade das terras escuras indígenas é geralmente maior do que a solos não antropogênicos da região amazônica. Esse fenômeno ocorre pelo manejo do solo indígena, o qual incluiu a incorporação de detritos carbonizados e resíduos orgânicos no solo.

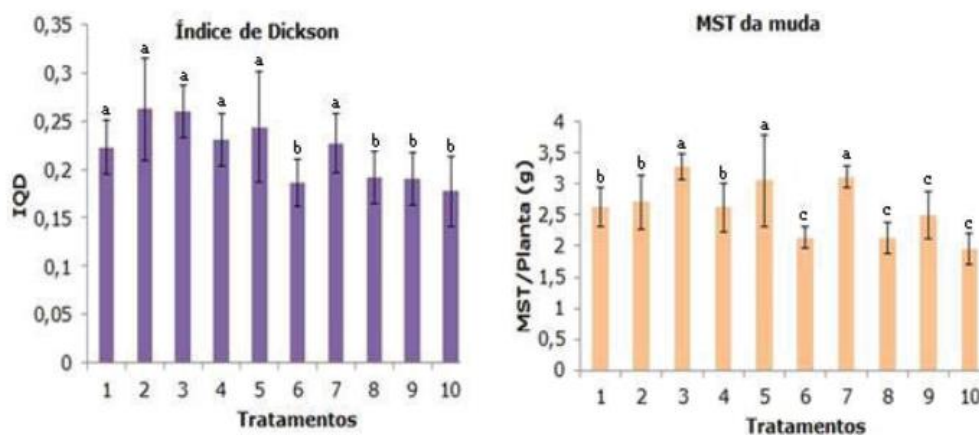
Figura 3 – Diagrama de análises utilizando dados de fertilidade da Terra Preta da Amazonia e solos não-antropogênicos.



Fonte: Petter e Madari (2012)

Resende *et al.* (2015) confirmaram os aspectos positivos do solo e constataram que os substratos utilizados em seu estudo produziram diferenças significativas entre as variáveis de resposta avaliadas. A Figura 4 apresenta os resultados considerando a relação entre os dados coletados e a matéria seca total (MST) das mudas de maracujá aos 60 dias após a semeadura. Os tratamentos 1, 2, 3, 4, 5 e 7 apresentaram resultados superiores aos tratamentos 6, 8, 9 e 10. Em relação ao MST, os tratamentos 3, 5 e 7 se destacaram em relação aos tratamentos 1, 2, 4, 6, 8, 9 e 10, que apresentaram resultados inferiores. Pode-se observar que os substratos contendo biocarvão ativado apresentaram os melhores resultados em relação aos demais tratamentos. Com o objetivo de aproveitar a serragem residual e reduzir o uso de substratos comerciais, os níveis de 25% de *biochar* ativado mostraram-se uma alternativa viável para os produtores de mudas. Mesmo com a mesma matéria-prima, mudar o processo de pirólise mostra que a qualidade do produto final (*biochar*) muda.

Figura 4 — Índice de Dickson e Matéria Seca Total das mudas de maracujá aos 60 dias após plantio.



*Tratamentos: 1 - Substrato Viveirista (SV); 2 - Substrato Comercial (SC); composições com SC e *Biochar* Ativado (BA): 3 - BA25, 5 - BA50, 7 - BA75, 9 - BA100 e as composições com SC e *Biochar* sem ativação (BSA): 4 - BSA25, 6 - BSA50, 8 - BSA75, 10 - BSA100.

Fonte: Rezende *et al.* (2015).

Batista (2018) também propôs resultados positivos advindo do uso do *biochar*. Em seu estudo, verificou se o uso de condicionadores de solo derivados de resíduos agrícolas e industriais podem melhorar a capacidade de retenção de água do solo e diminuir a toxicidade de metais em solos contaminados, através da complexação do *biochar* com sondas metálicas (Cu^{2+} e VO_2^+). Cinco *biochars* foram preparados por pirólise a baixa temperatura ($350\text{ }^\circ\text{C}$) sob atmosfera controlada de ar. As biomassas utilizadas foram: plantas de aguapé (AG), bagaço de cana (BC), casca de laranja (BL), cascas de coco verde (CS), cacho de dendê (DD) e finos de carvão (CV). Os solos investigados foram dois Neossolos Quartzarênicos, NEO1 e NEO2, do Estado de Sergipe, no Nordeste do Brasil. Após a mistura com 5% (m/m) de *biochar*, foi avaliado a WHC. Além disso, foi investigado a capacidade de complexação dos *biochars* com íons (Cu^{2+} e VO_2^+) de diferentes durezas de Pearson, avaliando as diferenças nos sítios de ligação formados. O estudo foi concluído evidenciando que o uso de *biochars* pode contribuir para aliviar o estresse hídrico em regiões áridas do nordeste brasileiro. Em relação à complexação do *biochar*, foi observado que houve complexação com o Cu^{2+} e VO_2^+ , exceto para a amostra CV. Portanto, é esperado que o *biochar* tenha potencialidade em quelar com outros íons presentes no meio em que for aplicado.

Com o mesmo objetivo, Sato *et al.* (2020) notaram que os resíduos da fibra e das sementes de açaí obtidos após o processamento da fruta são de alto potencial como biocarvão

e condicionador de solo. No estudo, o *biochar* foi produzido de modo artesanal e incorporado a dois tipos de solos. Após incubação de 270 dias, as amostras foram avaliadas quanto aos atributos físicos e químicos. Nove meses após a aplicação do biocarvão de semente de açaí, as propriedades físicas do solo não foram afetadas, exceto a distribuição granulométrica dos agregados do solo. O *biochar* aumentou os teores de fósforo, potássio e magnésio e reduziu o teor de alumínio. Com isso, pôde-se notar que dentro de um período de tempo relativamente curto, o *biochar* melhorou a qualidade química do solo, oferecendo assim potencial como uma solução sustentável para gerenciar resíduos de açaí na região amazônica.

Alves *et al.* (2016) avaliaram diferentes estratégias de fitorremediação e vermifurroremediação de solos contaminados com pesticidas e as respectivas vantagens e limitações de cada uma dessas biotecnologias. Foi evidenciado que a mobilidade e biodisponibilidade dos compostos xenobióticos no solo pode ser controlada por alterações orgânica ou inorgânica, sendo que a primeira apresenta vantagens mais eficazes sobre a segunda. Estas alterações em solos contaminados estimulam a produção de biomassa vegetal, aumentam a distribuição das raízes e sobrevivência da planta, biodisponibilizam os contaminantes e seus metabólitos às plantas melhorando a eficiência da fitoextração. Dentre os aditivos orgânicos mais relatados em processo de fitorremediação estão os resíduos agroindustriais, substâncias húmicas, *biochar* e matéria orgânica de fácil decomposição. Os extratos de plantas e exsudados, também apresentam benefícios à estrutura e características do solo, ao crescimento das plantas e na biodisponibilização do contaminante. O teor de matéria orgânica (MO) no solo também afeta a biodegradação de pesticidas ao proporcionar nutrientes suficientes para o crescimento microbiano e controlar o movimento do pesticida por processos de adsorção/dessorção. Mostraram também que a aplicação de biocarvão (*biochar*) em solos contaminados consegue imobilizar a ação dos xenobióticos no solo, limitando a biodisponibilidade e fitotoxicidade, além de melhorar o desenvolvimento das plantas, entretanto, as informações sobre o funcionamento das plantas fitorremediadoras na presença de biocarvão ainda são escassas, principalmente quando se trata de aplicação em escala de campo.

Alves *et al.* (2016) avaliaram diferentes estratégias de fitorremediação e vermifurroremediação de solos contaminados com agrotóxicos e as vantagens e limitações relativas de cada uma dessas biotecnologias. Foi demonstrado que a mobilidade e biodisponibilidade de compostos xenobióticos no solo podem ser controladas por fatores orgânicos ou inorgânicos, sendo o primeiro mais vantajoso que o segundo. Essas mudanças no solo contaminado estimulam a produção de biomassa vegetal, aumentam a dispersão das raízes e a sobrevivência das plantas,

tornam os poluentes e seus metabólitos biodisponíveis para as plantas e aumentam a eficiência da extração vegetal. Dentre os aditivos orgânicos citados em processos de fitorremediação está o *biochar*, pois pode promover melhora na estrutura e as propriedades do solo, o crescimento das plantas e a biodisponibilidade de poluentes. Eles também mostraram que a aplicação de *biochar* (*biochar*) em solo contaminado imobilizou a ação dos xenobióticos no solo, limitou a biodisponibilidade e a fitotoxicidade e melhorou o desenvolvimento das plantas. No entanto, pontuaram a escassez de pesquisas em campo como sendo uma limitação para aplicação desta inovação.

6 LIMITES E DESAFIOS

De acordo com Cavalcante *et al.* (2014), os valores da implementação do *biochar* podem variar por conta dos custos do processamento do *biochar*, o que inclui sua fabricação e o frete, a quantidade que será aplicada e a operação para realizar este processo. Com as informações apresentadas pelo autor, foi elaborada a Tabela 3.

Tabela 3 – Tipos de tratamentos considerados por Cavalcante *et al.* (2014) e seus respectivos custos.

Tratamento	Custo (em US\$ 2014)
Mudas sem <i>biochar</i> + testemunha (Mst);	US\$2.149,00 por hectare
Mudas com <i>biochar</i> ativado + testemunha (Mat);	US\$ 2.469,00
Mudas sem o <i>biochar</i> ativado + <i>biochar</i> ativado no solo (MsBa);	US\$ 7.860,00
Mudas com <i>biochar</i> ativado + <i>biochar</i> ativado no solo (MaBa);	US\$ 8.179,00
Mudas sem <i>biochar</i> ativado + <i>biochar</i> não ativado no solo (MsBn);	US\$ 11.096,00
Mudas com <i>biochar</i> ativado + <i>biochar</i> não ativado no solo (MaBn).	US\$ 24.731,00

Fonte: Cavalcante *et al.* (2014)

A diferença nos custos para cada tratamento está diretamente relacionada aos custos de processamento do biocarvão. Estes custos envolvem aqueles de produção, frete para transporte do *biochar* até o local desejado para aplicação, quantidade aplicada e operação de aplicação no solo. Quando se anula o custo de produção e obtenção do *biochar*, pode-se chegar a um valor de adoção da técnica de R\$ 5.899,00 ou US\$2.681,00. Em um cenário de uma indústria na mesma região, e reduzindo o custo de transporte do produto, esse custo seria de R\$ 19.898,00 ou US\$9.044,00 e se verificados os benefícios agrícolas da aplicação do *biochar*, esse é um fator que justifica a introdução da tecnologia (CAVALCANTE *et al.*, 2014).

Neste contexto, Maia, Madari e Novotny (2011) reforçou que o Brasil, em 2010, foi considerado o maior exportador mundial não apenas de café, açúcar, suco de laranja e tabaco, mas também de etanol, carne bovina e frango, e a segunda maior fonte de produtos derivados da soja. Nessa produção agrícola de alto volume, o primeiro desafio é a expressiva variedade de fontes de biomassa disponíveis para carbonatação. Cada fonte de biomassa tem condições específicas ideais para a produção de *biochar*, que são física e quimicamente diferentes, levando a diferentes respostas do solo e também devido às mudanças climáticas. Diante de todas essas possibilidades, é necessário priorizar fontes específicas de biomassa. Em sua pesquisa, ressaltaram que um dos principais desafios é encontrar a tecnologia do *biochar* (fonte, parâmetros de pirólise e aplicações) adaptada ao bioma Cerrado brasileiro. Para os autores, além dos desafios científicos de processos, mecanismos, efeitos agrônômicos e ambientais, a

pesquisa do *biochar* precisa ser realizada de acordo com cada peculiaridade regional ou mesmo local.

Batista e Gomes (2021) pontuaram que embora o Brasil seja engajado na produção de biocombustíveis, ainda há burocracias para desenvolvimento comercial de tecnologias de bioenergia. Isto envolve investimento em Pesquisa e Desenvolvimento em processos termoquímicos (como a pirólise) e ênfase no custo de mercado do *biochar*, que é menor do que o bio-óleo. Quando a venda de *biochar* ocorrer como um condicionador de solo com alto potencial de sequestro de carbono, a receita gerada a partir desta venda será perceptível quando houver diminuição em custos de biocombustíveis. Ainda, reforçam que alinhamentos políticos devem ser feitos para inserir o *biochar* no mercado, como uma estratégia de gestão de resíduos agrícolas, demonstrando em resultados científicos promissores. Relatam que há uma expectativa segundo a International *Biochar* Initiative (IBI) de que até 2050, 80% de todos os resíduos agrícolas e florestais poderão ser destinados a geração de bioenergia e *biochar*. Para isso, é de vital importância que a adoção da tecnologia de pirólise como estratégia, e aplicação de *biochar* em solos, ocorra de modo concomitante a incentivo de Pesquisa e Desenvolvimento para viabilização comercial.

É importante que a viabilização de custos ocorre, pois como estudado por Aria (2022), além dos benefícios ao meio-ambiente, o uso do *biochar* gera ganhos sociais e econômicos, como a maior autonomia dos agricultores em relação ao mercado de fertilizantes, a redução dos custos de produção e a geração de renda adicional por meio da venda de *biochar*.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos estudos reunidos e nas considerações realizadas, é evidente que o *biochar* ajuda a reduzir a quantidade de resíduos agrícolas produzidos e as emissões de gases de efeito estufa, além de melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, tornando-o um aliado à agricultura.

No entanto, a principal limitação do negócio de biocarvão no Brasil pode advir dos altos custos logísticos (devido ao vasto território brasileiro e à baixa densidade do produto). Além disso, é preciso um modelo de negócios de baixo investimento capaz de atender às necessidades dos agricultores brasileiros e que estes possam visualizar como uma alternativa real e praticável. Como um forno capaz de processar diferentes tipos de substratos para geração de biomassa, sem muitos ajustes. Portanto, para trazer o *biochar* para a indústria agrícola, é necessário entender o impacto dos tipos de biomassa e variações de produtos resultantes dos processos de conversão e suas interações com plantas, solos e insumos, com foco particular na economia. Para o último ponto relacionado a economia e custos, os principais desafios podem ser resumidos em:

- Logística: Adequação do suprimento e da infraestrutura necessária da cadeia produtiva completa para obtenção do *biochar*
- Técnica: Consolidação do setor de base industrial para a produção e instalação de plantas de tratamento térmico de biomassa;
- Político-Administrativa: Necessidade da elaboração de plano governamental efetivo para regular a inserção da biomassa como recurso para fins energéticos.

Especialmente no Brasil, a pesquisa sobre o *biochar* ainda é limitada e dispersa. Apesar da área de estudo aumentar ao longo dos anos, conforme demonstrado no gráfico 1, o mercado de *biochar* é inexistente no Brasil e incipiente a nível global. O Brasil dispõe de elevado potencial para aplicação dessas biotecnologias por possuir condições climáticas e biodiversidade mais favorável em comparação com regiões de clima temperado. Vale salientar ainda que os investimentos com despoluição no País tendem a crescer em decorrência das exigências globais por uma sociedade mais sustentável. Resolvidas as barreiras para a adoção do *biochar*, o mercado terá uma rápida expansão considerando tanto a disponibilidade de biomassa quanto os potenciais benefícios agrícolas do produto, promovendo a economia circular.

REFERÊNCIAS

- ALHO *et al.* Utilização de biochar para mitigação das emissões de óxido nitroso do solo *In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SUBSTÂNCIAS HÚMICAS*, 8., 2009, Pelotas. **Anais [...]** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2009.
- ALVES, O. R. *et al.* Biotecnologias de remediação de solos contaminados com agroquímicos. **Agrarian Academy**. Goiânia, v. 3, ed. 5, p. 27-50. Ago, 2016.
- ARIAS, C. M. **Biochar**: relação com a agroecologia, status da pesquisa e matérias-primas promissoras. 2022. Dissertação (Mestrado em Agroecologia e Desenvolvimento Rural) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2022.
- BATISTA, E. M. C. C. **Biochar como ligante macromolecular no solo visando aumentar a capacidade de retenção de água nos solos do nordeste do Brasil**. 2018. Tese (Doutorado em Química) – Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.
- BATISTA, R. R.; GOMES, M. M. Produção de biochar a partir da pirólise de biomassa: perspectivas e experiências brasileiras. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, Rio de Janeiro, RJ, v. 12, n. 8, p. 321-339, ago. 2021. Disponível em: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.008.0028>. Acesso em 15 de junho de 2023.
- CARMO, H. F.; SILVA, M. A. S.; MADARIC, B. E. Utilização do biochar como adicionador de carbono no solo e seus efeitos químicos nas propriedades do solo, sob feijoeiro comum no Cerrado brasileiro. *In: WORKSHOP INTERNACIONAL SOBRE CLIMA E RECURSOS NATURAIS NOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA*, 2., 2010. Bragança. **Anais [...]**, Bragança: Instituto Politécnico de Bragança, novembro de 2010. p. 159-165.
- CAVALCANTE, G. M. *et al.* Avaliação dos aspectos econômicos para o uso do biocarvão como condicionador de solo em Mato Grosso. *In: Semana Acadêmica - Sinop/2014*, 1., 2014, Sinop. **Anais [...]**. Brasília: Embrapa, 2014. p. 131.
- DOMINGUES, M. T. **Imobilização de fosfato em microesferas poliméricas contendo biochar**: preparação, caracterização e liberação lenta em sistemas aquosos. 2015. Dissertação (Mestrado em Área de Concentração Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, 2015.
- HARRIS, P. On charcoal. **Interdisciplinary Science Reviews**. Leeds, United Kingdom, v. 24, n. 8, p. 301–306. Apr. 1999.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agropecuária**. [Rio de Janeiro], 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria>. Acesso em: outubro 2021.
- LEHMANN, J. *et al.* Stability of biochar in soil. *In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (ed.). Biochar for environment management*. London: Sterling: Earthscan Publ., 2009. p. 183-198.
- LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management**: science, technology and implementation. 2. ed. Abingdon: Routledge, 2015.

- MAIA, C. M. B. F. Biochar: Uma Nova Ferramenta no Manejo de Solos. *In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO FLORESTAL*, 2; SEMANA DE ESTUDOS FLORESTAIS, 11., 2010a, Irati. **Anais [...]**. Irati: UNICENTRO, 2010. p. 1-7.
- MAIA, C. M. B. F. Finos de carvão: fonte de carbono estável e condicionador de solos. **Embrapa Florestas**, Colombo, p. 9-12, 2010b.
- MAIA, C. M. B. F.; MADARI, B. E.; NOVOTNY, E. H. Advances in Biochar Research in Brazil. **Dynamic Soil, Dynamic Plant**, v. 5, n. 1, p. 53-58. Sep. 2011.
- MORALES, M. M. *et al.* Sorption and desorption of phosphate with biochar. **Soil Use and Management**, England, v. 29, n. 3 p. 306–314. Sep, 2013.
- NÓBREGA, I. P. C. **Efeitos do biochar nas propriedades físicas e químicas do solo: sequestro de carbono no solo**. 2011. 46f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Instituto de Agronomia – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.
- PATEL, M.; ZHANG, X.; KUMAR, A. Techno-economic and life cycle assessment on lignocellulosic biomass thermochemical conversion technologies: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, ed. 10, p. 1486–1499. Feb, 2016.
- PEREIRA, J. R. C. **Potencial do biocarvão para a produção de milho e melhoria da qualidade do solo**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental para o Semiárido) – Universidade de Pernambuco, Petrolina, 2019.
- PETTER, F. A.; MADARI, B. E. Biochar: Agronomic and environmental potential in Brazilian savannah soils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.7, p.761–768. Abr, 2012.
- REZENDE, E. I. P. *et. al.* Biocarvão (Biochar) e Sequestro de Carbono. **Revista Virtual de Química**, Niterói, v. 3, n. 5, p. 428. Nov, 2011.
- REZENDE, F. A. *et al.* Uso do Biochar na Composição de Substratos para Produção de Mudas De Maracujá. *In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SUBSTÂNCIAS HÚMICAS*, 11., 2015, São Carlos. **Anais [...]**. São Carlos: Instituto de Química de São Carlos, 2015. p. 431-434.
- SÁNCHEZ-REINOSO, A. D.; ÁVILA-PEDRAZA, E. G.; RESTREPO-DÍAZ, H. Use of biochar in agriculture. **Acta Biológica Colombiana**, Bogotá, v. 25, n. 2, p. 327-338. Jul, 2019.
- SATO, M. K. *et al.* Biochar as a sustainable alternative to açai waste disposal in Amazon, Brazil. **Process Safety and Environmental Protection**, v.139, p. 36-46. Apr, 2020.
- SOARES, J. R. **Estudo de solos antropogênicos da Amazônia utilizando a espectroscopia Raman**. 2011. Dissertação (Mestrado em Física) – Departamento de Física, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- SOUZA, A. J. **Impacto da diversidade bacteriana sob a degradação clorotalonil no solo manejado com biochar**. 2016. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.
- VEIGA, T. R. L. A. *et al.* Caracterização de diferentes biomassas vegetais para produção de biocarvões. **CERNE**, v. 23, n. 4, p. 529-536. Out-Dez 2017.