

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

FACULDADE DE AGRONOMIA

COMISSÃO DE GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA

EDUARDA DA SILVA TRINDADE

BIOCHAR: UMA REVISÃO SOBRE SEUS USOS, COM FOCO NA AGROPECUÁRIA

Porto Alegre

2024

EDUARDA DA SILVA TRINDADE

BIOCHAR: UMA REVISÃO SOBRE SEUS USOS, COM FOCO NA AGROPECUÁRIA

Trabalho de conclusão de curso apresentado como
requisito para a obtenção do Grau de zootecnista,
Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio
Grande do Sul.

Orientador Prof. Dr. César Henrique Espírito Candal Poli
Coorientador (a) Joseane Anjos da Silva

Porto Alegre

2024

EDUARDA DA SILVA TRINDADE

BIOCHAR: UMA REVISÃO SOBRE SEUS USOS, COM FOCO NA AGROPECUÁRIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para a
obtenção do Grau de zootecnista, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio
Grande do Sul.

Data de aprovação: ____/____/____.

Professor Dr. César Henrique Espírito Candal Poli - Faculdade de Agronomia, UFRGS

Professora Dr. Caren Paludo Ghedini - Faculdade de Agronomia, UFRGS

Professora Dr. Vívian fischer- Faculdade de Agronomia, UFRGS

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, Cândia e André por me incentivarem a dar início a esta graduação e que diariamente me mantiveram lúcida do objetivo de concluir a mesma pelos motivos corretos de ter uma formação que possibilite auxiliar as pessoas. Que fizeram o possível e impossível para que conseguisse dar atenção plena aos meus estudos e caminhada acadêmica, onde foi possível adquirir além de um diploma um imenso crescimento pessoal. Estendendo para todos os membros da minha família que apoiaram este sonho e que fizeram parte desta caminhada de alguma forma.

A minha mais do que amiga Dara, que se tornou uma irmã de alma e me deu um dos melhores presentes da minha vida que é o Murilo Henrique. Sempre foi uma grande apoiadora dos meus estudos. Sempre me motivando a correr atrás dos meus sonhos e estando ao meu lado nos dias que não eram tão bons, lembrando que iria passar e que os próximos dias seriam melhores, que eu conseguiria enfrentar qualquer barreira. Queria agradecer por tudo que passamos juntas e lembrar que este apoio foi muito importante para que conseguisse concluir esta graduação e demais objetivos de vida. Vou sempre ser grata por todo este apoio e espero conseguir retribuir no mesmo nível.

Agradecer também a uma pessoa muito especial chamada Felipe, que teve a paciência de me compreender e motivar a cada dia que passava, sempre confiando no grande potencial que acredita que tenho. Estava ao meu lado em todos os dias de insegurança, ansiedade e preocupações e em todos os meses de distância, mas sempre me lembrando do propósito maior de toda esta caminhada. Gostaria de dizer que nunca vou esquecer de todas as palavras de apoio que com certeza foram determinantes para que não desistisse, de tudo que abriu mão para manter nossa relação firme e lembrar que foi e ainda é o motivo de grande parte do meu esforço diário para concluir os meus objetivos.

A meus colegas de graduação, que marcaram minha vida de alguma forma, especialmente a Ariane, Vanessa, Laura Oliveira e Laura Marques, que foram grandes apoiadoras e que trouxeram leveza aos dias difíceis na faculdade. Foram grandes companheiras nesta caminhada, e além de tudo garantiam sempre muitas risadas quando estávamos juntas. Espero poder ter sido tão especial para vocês o quanto foram e ainda são para mim. E para os demais amigos que fui ganhando nesta caminhada, como o Clevis e Joenir, que dividiram todos os momentos no período do estágio final e com certeza foram determinantes para que pudesse

suportar todas as situações pessoais e profissionais e que todos os dias me estimulavam a buscar a minha melhor versão e que desse o meu máximo todos os dias.

A todos os professores que tive a oportunidade de conhecer durante a graduação que de alguma forma contribuíram para minha formação profissional e pessoal. Agradecer especialmente ao professor César Poli, por sempre enxergar potencial em mim, por me proporcionar experiências que nunca esquecerei, como os plantões de parição das ovelhas que marcaram o início da minha paixão pela espécie. De sempre demonstrar seu lado humano, se importar em perguntar se estava tudo bem, se precisava de algo. Sempre estando disponível para conversas, esclarecer dúvidas e constantemente incentivando a buscar oportunidades, a continuar os estudos, escolher uma área que ame para trabalhar, assim como ele fez para que sempre queira dar o seu melhor e ser sua melhor versão. Gostaria de deixar claro que o senhor foi muito importante nesta jornada, me auxiliando a encontrar meu caminho profissional.

Agradecer imensamente a minha coorientadora Joseane, que foi muito importante para conclusão deste TCC, sem ela creio que teria sido muito mais difícil concluir este objetivo. Esteve presente em toda construção do trabalho, se preocupando em compreender e apoiar as minhas ideias, sempre com muito tato em suas considerações, que foram de grande valia para esta revisão.

Também gostaria de agradecer a empresa Quinta da Estância e SLC Agrícola que possibilitaram a conclusão dos meus estágios da graduação. Onde adquiri muito conhecimento e experiências em áreas que ainda não tinha contato e foram muito importantes para meu crescimento. Estendendo este agradecimento a todas as pessoas que me ajudaram nestes períodos, que fizeram estes momentos serem proveitosos com muito conhecimento profissional e mais leves, visto toda a pressão que passamos nestes momentos.

Por fim, gostaria que soubessem que todos vocês foram determinantes para conclusão desta graduação e que sem o apoio de vocês esta jornada teria sido imensamente mais difícil. Este é um pequeno ato de agradecimento, para que lembrem que esta conquista não é somente minha, todos foram de grande importância para que pudesse chegar onde cheguei e com isso gostaria que soubessem que nunca esquecerei este apoio e que tenho ciência de tudo que fizeram por mim. Deixar eternizado o meu muito obrigado a todos como pequeno gesto de gratidão por tudo.

RESUMO

Segundo projeções populacionais, a tendência de crescimento é acelerada e contínua, levando a crescente demanda por alimentos, por este motivo espera-se uma resposta pelo lado da oferta para que seja possível garantir a segurança alimentar. Assim é necessário que se busque alternativas para o aumento de produtividade dos agroecossistemas, que permita o aumento da produção de alimentos visando manter a sustentabilidade na produção, ou seja, manter o equilíbrio entre o aumento da produção com processos e produtos que não sejam prejudiciais para o meio ambiente.

Pela busca de produtos com estas características surge o biochar, é um composto de carbono obtido através de conversão térmica a partir de biomassa orgânica de diversas origens, resultando em produtos com alta área de superfície e porosidade e nutrientes concentrados que além de reduzir os gases de efeitos estufa, principalmente CO₂ e CH₄, apresenta características que auxiliam na nutrição animal e na recuperação e aumento da fertilidade do solo. O biochar pode sofrer variações conforme os métodos de produção, modificando a qualidade e os benefícios para o sistema. Existem diferentes processos de obtenção, mas na maioria deles utilizam a pirólise ou gaseificação, podendo ser conduzida de forma artesanal para pequenos produtores ou em plantas industriais.

O biochar possui diversos usos como no tratamento de água, na produção de calor, na geração de eletricidade ou de biocombustível, como aditivo de esterco/lodo e silagem, na alimentação/suplementação de animais e na adubação do solo. Estas aplicações apresentam benefícios potenciais, demonstrando resultados visíveis e duradouros. O foco desta revisão bibliográfica está no uso do biochar para fins de produção dos agroecossistemas, ou seja, para uso na agricultura e na pecuária. Especificamente no solo o biochar age aumentando a saúde do mesmo, melhorando suas características físicas, químicas e biológicas, aumentando o rendimento de culturas. Já na alimentação/suplementação de animais de produção, o biochar apresenta benefícios na saúde e desempenho produtivo, além de contribuir para a redução de gases do efeito estufa, sendo uma alternativa barata e com resultados eficazes. As produções abordadas incluem os ruminantes (bovinos, caprinos e ovinos), os suínos, os peixes e as aves, como frangos de corte e galinhas poedeiras.

Portanto, o objetivo principal desta pesquisa é buscar e compilar informações sobre o biochar e sobre seus usos e benefícios na pecuária, especificamente na alimentação ou suplementação de animais. Pretende-se com essa revisão disponibilizar uma literatura em português que explique os aspectos básicos do biochar e demonstre seu potencial de uso.

Espera-se com isso estimular novas pesquisas de forma a entender melhor o produto e descobrir novas áreas de uso e benefícios. Nesta revisão, pode-se concluir que nas produções agropecuárias, o biochar apresenta benefícios cientificamente comprovados, seja para saúde do animal, do seu desempenho produtivo, ou auxiliando em situações indiretas da pecuária como aditivo de silagem ou esterco, ou também beneficiando o solo em animais a pasto. Além disso, o biochar contribui para a minimização de gases do efeito estufa, sendo um produto positivo para o ambiente, economicamente viável e uma possibilidade de melhoria da gestão de resíduos.

Palavras chave: Utilização do biochar/use of biochar, biocarvão na alimentação animal/biochar in animal feed e benefícios do biochar/ benefit of biochar.

ABSTRACT

According to population projections, the growth trend is accelerated and continuous, leading to growing demand for food, for this reason a response on the supply side is expected to ensure food security. Therefore, it is necessary to look for alternatives to increase the productivity of agroecosystems, which allows for an increase in food production, but which maintains the concern of not being harmful to the environment.

Through the search for products with these characteristics, biochar emerges, it is a carbon compound obtained through thermal conversion from organic biomass of different origins, resulting in products with high surface area and porosity and concentrated nutrients that, in addition to reducing greenhouse gases, greenhouse effects, mainly CO₂ and CH₄, has characteristics that help in animal nutrition and in the recovery and increase of soil fertility. Biochar can undergo variations in production methods, modifying the quality and benefits to the system. It has different production processes, but most of them use pyrolysis or gasification, and can be carried out artisanally for small producers or in industrial plants.

Biochar has several uses, such as water treatment, heat production, electricity or biofuel generation, as an additive to manure/sludge and silage, in animal feed/supplementation and in soil fertilization. These applications present potential benefits, demonstrating visible and lasting results. The focus of this literature review is on the use of biochar for the production of agroecosystems, that is, for use in agriculture and livestock. Specifically in the soil, biochar acts to increase soil health, improving its physical, chemical and biological characteristics, increasing crop yields. In the feeding/supplementation of production animals, biochar presents benefits in health and productive performance, in addition to contributing to the reduction of greenhouse gases, being a cheap alternative with effective results. The productions covered include ruminants (cattle, goats and sheep), pigs, fish and poultry, such as broilers and laying hens.

Therefore, the main objective of this research is to seek and compile information about biochar and its uses and benefits in livestock farming, specifically in feeding or supplementing animals. The aim of this review is to provide literature in Portuguese that explains the basic aspects of biochar and demonstrates its potential for use. This is expected to stimulate new research in order to better understand the product and discover new areas of use and benefits. In this review, it can be concluded that in agricultural production, biochar has scientifically proven benefits, whether for the health of the animal, its productive performance, or helping in

indirect livestock situations as an additive to silage or manure, or also benefiting the soil in pasture animals. Furthermore, biochar contributes to the minimization of greenhouse gases, being a positive product for the environment, economically viable and a possibility for improving waste management.

Keywords: Use of biochar, biochar in animal feed and benefits of biochar.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. METODOLOGIA	11
3. OBJETIVO	12
4. BIOCHAR	13
4.1 Obtenção	15
4.2 Aplicações do biochar	21
4.2.1 Uso e benefícios agrícolas	23
4.2.1 Uso e benefícios na pecuária	27
4.2.2.1 Mecanismo de ação no rúmen	31
4.3 Ideia do ciclo fechado	34
4.4 Desafios	34
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
REFERÊNCIAS	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de estrutura aromática funcional e estrutura do grafite que o biochar se assemelha pós conversão térmica	14
Figura 2 – Representação da formação de poros durante a conversão térmica. No lado esquerdo a figura demonstra as células da biomassa em formato de favo de mel antes da conversão térmica. No lado direito a representação da formação de poros (espaço sem preenchimento dentro da célula), conforme aumenta a temperatura	14
Figura 3 - Representação do equipamento utilizado na carbonização hidrotérmica	16
Figura 4 – Demonstração do equipamento adaptado de produção de biochar chamado barril ELSA	17
Figura 5 – Demonstração do equipamento adaptado de produção de biochar chamado “retorta aberta do Japão”	18
Figura 6 – Demonstração do forno Kon-Tiki para produção de biochar	19
Figura 7 - Planta de equipamento para produção de biochar da empresa Olten Environmental	19
Figura 8 – Planta de equipamento para produção de biochar da empresa Zhengzhou Jiutian Machinery	20

1. INTRODUÇÃO

A tendência de crescimento é acelerada e contínua, segundo projeções populacionais (Saath & Fachinello, 2018). Por consequência disso, ocorrerá uma crescente demanda por alimentos, sendo necessário que haja uma resposta pelo lado da oferta, para que seja possível garantir a segurança alimentar (Qomariyah *et al.*, 2022). Visto que, atualmente existe uma grande preocupação com as questões ambientais e preservação de áreas nativas, a opção de expansão do uso de terras é limitada como solução deste desafio. Sendo assim, será necessário que se pense em alternativas para melhoria da produtividade, como um potencial caminho para o aumento da oferta (Saath & Fachinello, 2018).

Junto da capacidade de aumentar a produtividade das cadeias de alimentos, é necessário que se mantenha a preocupação com a sustentabilidade, que hoje é uma preocupação geral. Neste contexto, faz-se importante manter o equilíbrio entre o aumento da produção de alimentos e a preservação ambiental, buscando novas tecnologias e produtos que minimizem os impactos negativos ao ambiente para não comprometer o acesso das gerações futuras aos recursos naturais.

Como um destes novos produtos desponta o biochar, também chamado de biocarvão. Biochar é um composto de carbono obtido através de conversão térmica (geralmente pirólise) de biomassa orgânica com concentração limitada de oxigênio (Lehmann, 2007). Ele pode ser obtido de diferentes matérias-primas, o material resultante é caracterizados por uma alta área de superfície e porosidade (Toth & Dou, 2016).

O biochar apresenta diversas aplicações e benefícios potenciais, demonstrando resultados visíveis e duradouros, principalmente nos agroecossistemas, como o aumento da produtividade das culturas e a modificação do conteúdo de nutrientes do solo. Além disso, ele pode ser obtido de muitos materiais residuais, solucionando de forma fácil e sustentável os desafios atuais em operações agrícolas concentradas (Cosette *et al.*, 2023). Para a finalidade de solucionar esses desafios, o biochar pode ser usado como uma estratégia de gestão dos resíduos (Panwar *et al.*, 2019), conferindo um fim a eles e permitindo a devolução dos mesmos para o sistema como fertilizantes e/ou outros produtos. É considerado um material barato, constantemente disponível e em abundância, além de apresentar grande potencial na agricultura sustentável para mitigar a emissão de gases de efeito estufa (GEE), contribuindo para o sequestro de carbono (Lehmann, 2007; Ferreira, 2023).

Há possibilidade de outros usos do biochar, como no tratamento de água, atuando na remoção de metais pesados, elementos tóxicos e contaminantes da água com baixo custo e eficácia (Panwar *et al.*, 2019; Tan *et al.*, 2016). A transformação do resíduo, como esterco suíno em biochar facilita o transporte e manuseio do mesmo para áreas que necessitam desta aplicação, pois transforma em material sólido o resíduo rico em fósforo (Brassard *et al.*, 2016). Apresenta uso como aditivo de esterco/lodo, agindo como excelente adsorvente e ajudando nos processos de compostagem (Kalus *et al.*, 2019). Utilizado, também, como aditivo de bai, contribuindo para o aumento da qualidade, e apresentando-se favorável na análise de custo benefício, representando cerca de um décimo dos custos dos inoculantes comerciais (Bai *et al.*, 2021).

Segundo Maurer *et al.* (2017), o biochar pode ser uma opção economicamente viável para controlar as emissões gasosas do esterco armazenado. Ademais, na pirólise ele pode gerar produção de calor, eletricidade ou biocombustíveis (Lehmann, 2007), tornando possível o uso em conjunto, gerando dois insumos em um só processo.

Possui uso na suplementação animal, este ainda é pouco explorado, mas vem sendo mais estudado e utilizado desde o ano de 2010. A pesquisa e o uso na pecuária é reflexo da alta demanda por alimentos de origem animal, atualmente, que contribuem com cerca de um terço do consumo humano de proteína. Dessa forma, é necessária uma estratégia para aumentar o desempenho dos animais de forma eficiente, de modo que não interfira na saúde e no bem-estar do ser humano, que não dependa do uso de antibióticos, que seja benéfica para os setores comerciais e não tenha um impacto negativo sobre o meio ambiente (Qomariyah *et al.*, 2022). Os resultados obtidos a partir deste uso demonstram efeitos positivos. O biochar apresenta-se como um meio favorável para melhorar a saúde dos animais e o seu desempenho produtivo, além de incrementar outros campos potenciais de utilização (Kalus *et al.*, 2019).

Portanto, o objetivo deste trabalho é realizar uma revisão bibliográfica sobre o biochar. Os assuntos abordados incluem o seu conceito, histórico, processos envolvidos em sua obtenção, seus atuais e potenciais usos dentro da agricultura e pecuária, entre outros. O foco principal é buscar e compilar informações sobre o uso, benefícios e desafios do biochar na alimentação de animais de produção.

2. METODOLOGIA

A metodologia selecionada para esta pesquisa foi uma revisão bibliográfica de caráter exploratório, com a análise de documentos aos quais já foram pesquisados e escritos no âmbito geral sobre o biochar. Especificamente procurou-se descrever sobre o seu uso em diversas áreas e analisando os benefícios que este pode trazer na alimentação de animais de produção.

O conteúdo do presente trabalho foi obtido de diversas fontes de pesquisas, incluindo referencial brasileiro e estrangeiro, com a possibilidade de ser identificado em artigos científicos, teses, publicações, resultados em trabalhos de conclusão de curso, dissertações, relatórios técnicos e livros. Esses materiais foram encontrados principalmente nos bancos de dados Google Acadêmico, ScienceDirect, SciELO, Portal CAPES, EMBRAPA, MDPI, Scopus entre outros. Com as palavras chaves: biocarvão/biochar e biocarvão na alimentação animal/biochar in animal feed.

No momento seguinte à identificação das publicações, foi feita uma avaliação criteriosa dos materiais quanto ao conteúdo abordado, qualidade e relevância para a revisão, selecionando materiais para o entendimento do assunto e para afirmações específicas com dados relevantes e pertinentes ao tema.

3. OBJETIVO

1. Objetivo geral

Realizar uma revisão de literatura com objetivo de compilar informações sobre o biochar, seus potenciais usos e benefícios, especialmente na agropecuária.

1.1 Objetivos específicos

1. Reunir informações científicas do biochar, contemplando o conceito, histórico, características próprias, métodos e processos de obtenção, atuais e potenciais usos na agricultura, pecuária e demais áreas, e os benefícios e desafios que apresenta;
2. Disponibilizar uma pesquisa que abranja informações sobre o biochar e seu uso em Português, visto que a maioria da literatura disponível é estrangeira.
3. Buscar informações específicas sobre o uso e benefícios do biochar na alimentação de animais de produção;
4. Investigar quais áreas na produção animal estão utilizando o biochar ou poderiam utilizar, focando na produção de ruminantes;
5. Averiguar os benefícios do biochar diretamente ligados aos animais e de forma indireta para o ambiente;
6. Demonstrar a versatilidade e potencial deste produto.

4. BIOCHAR

A origem do biochar vem de estudos dos solos da região amazônica, solos profundos e muito férteis chamados “Terra Preta de índio” (TPI) que foram identificadas a partir de observações de solos onde havia sido feita uma fogueira ou semelhante pelos índios. Esse solo tem sido utilizado para fins agrícolas na Amazônia há séculos (Maia, 2010) e ainda possui característica de sequestro de carbono que vem atraindo atenção. A presença deste tipo de solo evidencia a sua criação pelo homem, demonstrando que a produção de biochar é praticada desde o início da evolução humana (Panwar *et al.*, 2019). Com estas descobertas as pesquisas se dão no sentido de produzir um material semelhante ao produzido inicialmente pelos indígenas, visando manter estas características.

Deste modo, Lehmann & Joseph (2009) apresentaram quatro objetivos motivacionais da aplicação de biochar: na melhoria do solo, gestão de resíduos, mitigação das mudanças climáticas e energia. Esses objetivos podem ser propostos individualmente ou trabalhados em conjunto (mais de um objetivo ao mesmo tempo), sempre apresentando benefícios, sejam sociais, ambientais ou financeiros.

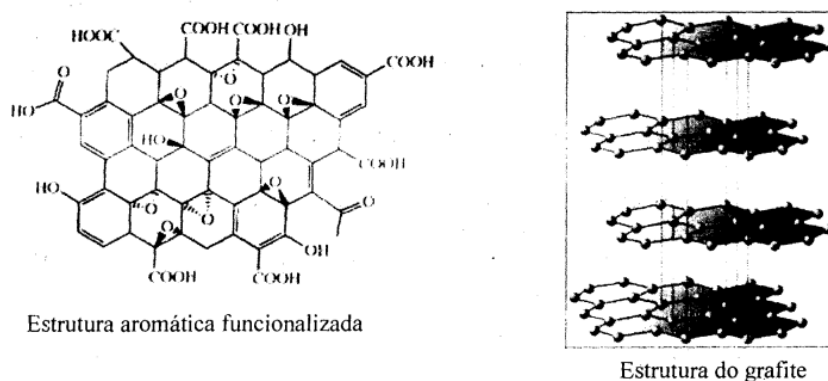
O termo biochar foi adotado para evidenciar a diferença do combustível fóssil do carvão ativado proveniente da queima da biomassa (Bapat *et al.*, 1999). O Biochar é um composto de carbono obtido através de conversão térmica (geralmente pirólise) de biomassa orgânica com concentração limitada de oxigênio (Lehmann, 2007). Esta biomassa pode ser de origem industrial, resíduos agropecuários e urbanos. O produto obtido apresenta uma alta variedade de propriedades físico-químicas, dificultando uma caracterização química exata, pois sofre alterações com base nas diferentes matérias-primas, no método e condições de obtenção e na porcentagem de nutrientes no material (Batista *et al.*, 2018; Steinbeiss *et al.*, 2009; Kizito *et al.*, 2019; Martins, 2018).

Sua estrutura química compreende anéis aromáticos policondensados onde folhas de grafeno cristalino empilhadas e estruturas aromáticas amorfas ordenadas aleatoriamente podem ser identificadas. Nesta estrutura com heteroátomos, como O, N, P e S, são predominantemente ligados nos anéis aromáticos, contribuindo assim para a química de superfície complexa e a reatividade do biochar (Conte *et al.*, 2021 *apud* Bourke *et al.*, 2007). O biochar tem baixo teor de nitrogênio (N), apresentando uma elevada relação C/N e baixa taxa de mineralização (Benites *et al.*, 2009). Pela estrutura comum ser de carbono recalcitrante, e macro e micronutrientes, os diferentes tipos de biochar apresentam

características semelhantes, como a cor escura, pH de neutro a básico, alto conteúdo de C e elevado grau de aromaticidade (Lehmann *et al.*, 2011).

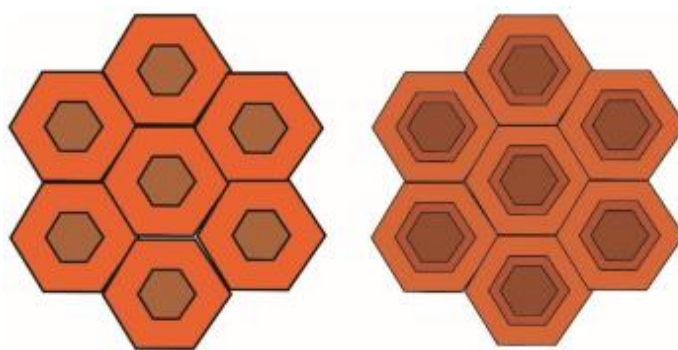
O material sofre alterações conforme o método e condições de conversão térmica. Quanto a conversão térmica, conforme a temperatura aumenta, a estrutura aproxima-se a do grafite, formando uma cadeia carbônica aromática com pouca funcional (Figura 1). O biochar apresenta baixas razões O/C e H/C, conferindo resistência a degradação (recalcitrância) e a alta estabilidade química (Maia, 2010). Além destas características, é um material com alta área superficial e que possui alta porosidade (Figura 2), que varia de nano (<0.9 nm), micro (<12 nm) a macroporos (>50 nm) (Lehmann & Joseph, 2009).

Figura 1: Exemplo de estrutura aromática funcional e estrutura do grafite que o biochar se assemelha pós conversão térmica.



Fonte: Maia, 2010.

Figura 2: Representação da formação de poros durante a conversão térmica. No lado esquerdo a figura demonstra as células da biomassa em formato de favo de mel antes da conversão térmica. No lado direito a representação da formação de poros (espaço sem preenchimento dentro da célula), conforme aumenta a temperatura.



Fonte: Adaptado de Conte *et al.*, 2021.

4.1 Obtenção

Inúmeras matérias-primas podem ser utilizadas para a obtenção de biochar, algumas possuem maior destaque como os resíduos industriais e agrícolas. O uso dos resíduos traz um grande apelo ambiental, por oferecer um destino a esses produtos. Algumas das matérias-primas citadas na literatura são cascas de amendoim e de coco, resíduos de mangue, cama de frango, resíduos suínos, aviário e leiteiro, madeira ou serragem de pinus e eucalipto, palhas de trigo e de milho, resíduos de mamona entre outros (Kalinke, 2019).

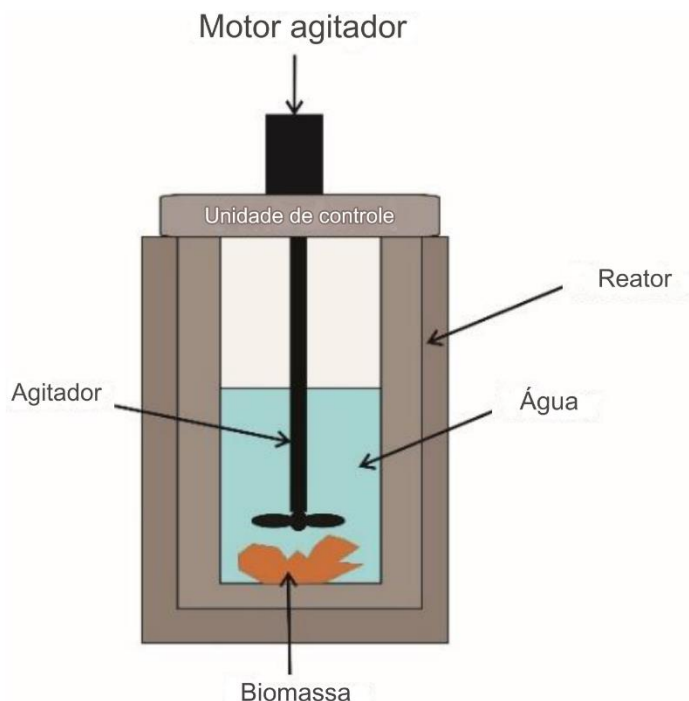
Segundo o European Biochar Certification (EBC), as matérias-primas que podem ser utilizadas para a produção de biochar estão presentes na lista positiva de biomassas permitidas. Este documento pode ser utilizado como guia, visto que a legislação brasileira ainda não possui este tipo de orientação. Dentre as biomassas listadas, estão as de agricultura como as de culturas energéticas anuais como milho; biomassa lenhosa de plantações, como poda de árvores; resíduos de colheita, como palhadas vegetais e sementes. Estão listados também as biomassas permitidas da silvicultura e processamento da madeira, como serragem e madeira; biomassas de gerenciamento de paisagens, que são os resíduos, como folhagens, raízes, resíduos de paisagismo; biomassas de resíduos orgânicos e detritos de processos industriais ou de coletas de reciclagem; subprodutos de origem animal; lodos de tratamento de águas residuais; resíduo da indústria têxtil; resíduos de processamento de origem vegetal; restos de alimentos.

Os produtos citados fazem parte da listagem das biomassas permitidas pela EBC. Junto desta listagem, encontram-se os aditivos que são permitidos. Esses aditivos tem o objetivo de melhorar as condições de pirólise e a qualidade do biochar. São permitidos em quantidades de 10% da MS total, e alguns exemplos são; cal, bentonita, pó de rocha, argila, solo, cinzas de madeira e plantas.

Os métodos de produção do biochar são os mais diversos, os artigos encontrados trazem em sua maioria o processo termoquímico chamado de carbonização ou pirólise e a gaseificação. A pirólise trata-se da conversão termoquímica da biomassa realizada na ausência de ar e a uma temperatura superior a 400°C para formar um produto sólido que consiste principalmente de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e cinzas. Ainda sobre a pirólise, existe diferentes tipos: a lenta, intermediária e rápida. Estudos mostraram maior rendimento do biochar utilizando a lenta (Panwar *et al.*, 2019).

A carbonização hidrotérmica (CHT; Figura 3) também é uma opção na produção de biochar. É um processo de conversão termoquímica usando água como meio de reação solvente a temperaturas de 150 a 350°C (Zhang *et al.*, 2019). Tem a vantagem de possuir um menor consumo energia térmica em comparação à pirólise, porém com limitação de não controlar com precisão a pressão de operação (Conte *et al.*, 2021).

Figura 3: Representação do equipamento utilizado na carbonização hidrotérmica.



Fonte: Adaptado de Conte *et al.*, 2019

Além disso, alguns dos artigos selecionados trazem formas mais artesanais de produção do biochar. Eles tratam de dois equipamentos adaptados, um deles o gaseificador simples de corrente ascendente com iluminação superior (Figura 4), baseado em um equipamento chamado barril ELSA. A conversão térmica é realizada através da oxidação parcial da biomassa à alta temperatura, geralmente entre 500-1100°C. O agente oxidante utilizado pode ser o ar, oxigênio puro ou vapor (Sales *et al.*, 2005). Para a confecção deste equipamento adaptado do barril ELSA é utilizado um barril de óleo modificado (com aberturas para facilitar o fluxo de ar) e uma abertura na parte superior para encaixe de uma chaminé. Como resultado, este apresentou a mesma funcionalidade do barril ELSA como gaseificador e neste caso o equipamento funcionou melhor com itens maiores como espigas

de milho. Assim, foi descoberto que possui eficiência, mesmo de forma simples, facilitando para agricultores produzirem no campo.

Segundo Conte *et al.* (2021), a gaseificação pode ser referida como carbonização termoquímica industrial. Traz o entendimento de que este processo quando feito industrialmente produz gás de síntese que pode ser aplicado na produção de energia, enquanto o biochar é obtido como um subproduto de baixo custo, ou seja, neste processo dois produtos estão sendo gerados, agregando valor. O processo em si, se dá com a colocação da biomassa em um reator onde é parcialmente oxidada por aquecimento a temperaturas tão altas quanto 1200°C, e o gás de síntese que é produzido consiste em uma mistura de monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio, metano e nitrogênio.

Figura 4: Demonstração do equipamento adaptado de produção de biochar, chamado barril ELSA.



Fonte: Adaptado de Steiner *et al.*, 2018

O outro método empregado é a chamada “retorta aberta do Japão” (Figura 5). Neste estudo foi utilizado somente para casca de arroz. É utilizada na Ásia e a sua confecção se dá a partir de uma chaminé com um funil perfurado (cone) em uma das extremidades. É feita uma fogueira na parte interna e por fora é coberto pelo resíduo. Nesse caso, os gases são liberados pela chaminé e o resíduo sofre a carbonização (Steiner *et al.*, 2018).

Figura 5: Demonstração do equipamento adaptado de produção de biochar chamado “retorta aberta do Japão”.



Fonte: Adaptado de Steiner *et al.*, 2018

Existem outros métodos e ferramentas que podem ser úteis para produção de biochar. Outro exemplo que Conte *et al.* (2021) traz em seu artigo é o forno Kon-Tiki (Figura 6), utilizado quando são necessárias grandes quantidades de material para fins agrícolas. O princípio da pirólise da cortina, ou chamado Forno Kon-Tiki de chama, consiste em pirolisar a biomassa camada por camada em um forno metálico de formato cônico ou em um poço (Schmidt *et al.*, 2015). A vantagem do forno Kon-Tiki é a maior quantidade de biochar que pode ser produzida, mas a grande limitação é a impossibilidade de controlar todas as condições de pirólise, levando a produtos com propriedades físicas-químicas distintas. Entretanto, Conte *et al.* (2021) comentam que o biochar obtido por este procedimento caseiro pareceu ser muito eficaz no aumento da produção de abóbora, cultura a qual foi testada.

Figura 6: Forno Kon-Tiki para produção de biochar.



Fonte: Biochar Journal

Existem também os equipamentos industriais. Estes, em sua maioria, utilizam o processo de carbonização/pirólise. Dois exemplos de equipamentos para produção de biochar são das empresas Zhengzhou Jiutian Machinery (ZJM; Figura 7) e Olten Environmental (OE; Figura 8). O biochar do equipamento da ZJM pode ser aplicado no solo ou usado como combustível devido a purificação do gás no processo. O equipamento da OE utiliza o processo de pirólise/carbonização contínua de alta eficiência e ecologicamente corretos, pois levam em consideração a economia de energia e a não produção de fumaça ou poeira que podem poluir o ar.

Figura 7: Planta de equipamento para produção de biochar da empresa Olten Environmental.



Fonte: Olten Environmental.

Figura 8: Planta de equipamento para produção de biochar da empresa Zhengzhou Jiutian Machinery.



Fonte: Zhengzhou Jiutian Machinery.

O produto final biochar depende das condições do processo em que está sendo submetido. Situações como altas temperaturas ($>500^{\circ}\text{C}$) tornam o produto quimicamente mais estável e mais resistente a degradações microbianas e abióticas. Esse processo contrasta com os biochars produzidos a partir da pirólise de resíduo de madeira de coníferas realizada a temperaturas mais baixas (exemplo 350°C). Ela apresenta tendência de conter grandes quantidades de nutrientes disponíveis pela menor perda de grupos funcionais (Conte *et al.*, 2021).

Após o processo, o biochar pode sofrer também o que chamam de ativação, ou seja, suas propriedades podem ser moduladas com objetivo de levar a melhora de alguma característica específica que seja de interesse para determinado uso. A ativação pode ser química e/ou física, e algumas substâncias podem ser efetivamente adsorvidas, como álcoois, analgésicos, agentes antimicrobianos, toxinas de plantas e animais, toxinas endógenas e gases como metano e gás estomacal. Essa ativação pode aumentar a área de superfície e densidade de poros, para aumentar a capacidade de capturar poluentes e outras partículas de interesse (Ka Yan Man *et al.*, 2020). Um outro exemplo comum desta ativação é para casos de necessidade na degradação dos poluentes orgânicos em águas ou solos tratados que podem ser aplicados para remediação ambiental e remoção de contaminantes orgânicos. Esta ativação melhora a capacidade de sorção para contaminantes orgânicos e inorgânicos em comparação com não ativados (Conte *et al.*, 2021). Isto ocorre pela oxidação superficial do biochar e a introdução de mais grupamentos funcionais no material,

melhorando assim a sua capacidade de adsorção/interação. O biochar pode apresentar características físico-químicas e propriedades distintas, dependendo da ativação realizada (Kalinke, 2019).

Existem também a opção de adquirir o produto biochar pronto para uso. Após pesquisas, encontrou-se empresas como a Biochar Technologies, com origem em São Paulo, que produz o biochar para uso agrícola, sendo que um dos principais benefícios do produto é estimular o uso através da possibilidade dos produtores receberem créditos de carbono. E a empresa Aperam bioenergia de Minas Gerais, sendo ainda a primeira empresa do Brasil habilitada a comercializar os créditos de Captura e Armazenamento de Carbono (CORCs) e pioneiras na venda de créditos de carbono na América Latina e produtora de biochar com qualidade cientificamente comprovada.

4.2 Aplicações do biochar

Conforme Lehmann & Joseph (2009), existem quatro objetivos motivacionais da aplicação de biochar, são eles na melhoria do solo, gestão de resíduos, mitigação das mudanças climáticas e energia. Em todos estes casos, a aplicação traria benefícios, fossem eles sociais ou financeiros. Atualmente o biochar possui estes e diversos outros usos, mas com o passar dos anos e com a intensificação das pesquisas exploratórias, descobre-se uma ampla gama de atividades em que o biochar pode ser útil e que por vezes é a solução de barreiras que anteriormente não apresentavam soluções como a própria gestão de resíduos.

Uma de suas características mais marcadas nas pesquisas é a capacidade adsorvente. Essa característica é adquirida no processo de produção do biochar. Conforme Conte *et al.* (2021), a quantidade progressivamente maior de componentes orgânicos voláteis liberados da matéria-prima com o aumento da temperatura é responsável pela redução dos grupos funcionais de superfície que, por sua vez, causam as propriedades de adsorção dos biochars, que se caracteriza pela capacidade de preenchimento dos seus poros por adsorção física.

O biochar é utilizado no tratamento de água, atuando na remoção de metais pesados, elementos tóxicos e contaminantes da água e águas residuais, apresentando baixo custo e alta eficácia (Panwar *et al.*, 2019; Tan *et al.*, 2016). Segundo Li *et al.* (2018), o biochar pirolisado em alta temperatura igual ou maior que 500°C apresentou maiores capacidade de sorção para a toxina microcistina -LR. Microcistinas são cianotoxinas, liberadas pela cianobactéria *Microcystis aeruginosa*, que estão presentes, por exemplo, em mananciais de água para abastecimento humano e que podem ameaçar a saúde humana, podendo levar,

em casos graves, até a óbito (Almeida *et al.*, 2016) o que torna importante esta função do biochar, que pode ser comparável com adsorventes comerciais como nanotubos, sílica, mesoporosa e carvão ativado.

Especificamente na gestão de resíduos, a produção do biochar possibilita a produção (pirólise) do esterco suíno reduzindo para uma massa de fração sólida em 65-88% no qual o fósforo está concentrado e pode ser transportado, devido a sua natureza mais estável, de forma facilitada para regiões mais distantes com objetivo de corrigir o solo (Brassard *et al.*, 2016). O biochar pode ser usado como aditivo de esterco/lodo, agindo como excelente adsorvente e ajudando nos processos de compostagem, devido sua alta porosidade e alta área de superfície. Assim, ele é capaz de reter elementos importantes como nitrogênio, carbono e enxofre que em uma situação comum seriam perdidos para o ambiente, e também age como substrato para microrganismos que participam nos processos de compostagem (Kalus *et al.*, 2019). Na digestão do esterco que contenha como aditivo o biochar, obtém-se menos amônia e metano e, por consequência, maior retenção de nitrogênio (Schmidt *et al.*, 2017).

Utilizado, também como aditivo de silagem, o biochar de esterco de iaque, quando adicionado ao sorgo doce ensilado, aumentou as concentrações de proteína bruta, ácido láctico e carboidratos solúveis em água e aumentou o rendimento energético bruto, ou seja, o biochar foi capaz de melhorar a qualidade da silagem. Além disso, ele apresentou-se favorável na análise de custo benefício, representando cerca de um décimo dos custos dos inoculantes comerciais. Por fim, pode-se concluir que o biochar cumpre o objetivo de auxiliar no processo de fermentação da silagem e ainda é economicamente viável para a produção (Bai *et al.*, 2021). O biochar pode reduzir a formação de micotoxinas, ligar-se a pesticidas, suprimir a formação de ácido butírico e aumentar a qualidade das bactérias lácticas. Nas pesquisas ele não apresentou qualquer efeito negativo no fluido ruminal, sendo considerado um método interessante para ser incorporado como inoculante na silagem, assim sendo aplicado nos sistemas agrônômicos (Pereira *et al.*, 2014).

Segundo Maurer *et al.* (2017), o biochar pode ser uma opção economicamente viável para controlar as emissões gasosas do esterco armazenado. Como exemplo, cita-se que o biochar é promissor na operação de reduzir as emissões de NH₃ em esterco suíno, e é um subproduto da pirólise na produção de calor, eletricidade ou biocombustíveis (Lehmann *et al.*, 2007), tornando possível o uso em conjunto, gerando dois insumos em um só processo.

Diretamente nos agroecossistemas que são o foco desta revisão, observa-se o fato de o biochar poder ser obtido de muitos materiais residuais, existindo a possibilidade de

solucionar de forma fácil e sustentável os desafios atuais em operações agrícolas concentradas, como citado por Cosette *et al.* (2023). Ainda, segundo Panwar *et al.* (2019), pode ser usado como uma estratégia de gestão dos resíduos.

Além disso, a definição do Certificado Europeu de Biochar (EBC) também traz outros possíveis usos do biochar que vai sendo descoberto como um novo material. Entre os demais usos estão a aplicação na indústria de papel e celulose, na fabricação de materiais de construção avançados, em aparelhos eletrônicos, na impressão 3D, no tratamento de esgoto, na mineração, na filtragem de ar, na indústria têxtil e na pecuária.

Para fins agronômicos, o biochar apresenta uso na aplicação do produto no solo como fertilizante e corretivo, gerando melhorias na características físico-químicas do solo que resultam em aumento da produtividade das culturas. Ele pode ser utilizado na agricultura sustentável, mitigando a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e contribuindo para o sequestro de carbono (Lehmann *et al.*, 2007; Ferreira, 2023), além de agir também como adsorvente de contaminantes orgânicos e inorgânicos (Brassard *et al.*, 2016).

Na pecuária é utilizado principalmente na suplementação animal, mas este ainda é pouco explorado. O biochar vem sendo mais estudado e utilizado desde o ano de 2010. Conforme a EBC, os usos do biochar na pecuária são considerados novos e ainda precisam de mais pesquisas, mas atualmente apresenta-se como um meio favorável para melhorar a saúde dos animais e o seu desempenho produtivo (Kalus *et al.*, 2019). O uso na pecuária e agronômico serão discutidos com detalhamento nos tópicos abaixo.

4.2.1 Aplicações e benefícios agrícolas

Após o descobrimento das propriedades das Terras Pretas de Índio (TPI), houve o interesse na produção do biochar para mimetizar estes benefícios com a aplicação do produto gerado no solo (Ding *et al.*, 2016). Conforme Schmidt *et al.* (2017), a sua produção e utilização é uma nova estratégia na gestão de resíduos agrícolas que tem como objetivo reduzir a poluição ambiental e melhorar as características do solo, entre os outros usos que pode possuir.

Um ponto que estimula o uso do biochar são os danos físicos ao solo e ambientais que os fertilizantes químicos podem trazer. Conforme citam Panwar *et al.* (2019) e Lehmann & Joseph (2009), o uso de fertilizantes químicos pode resultar em endurecimento do solo, diminuição da fertilidade natural, levar a poluição do ar e da água, e afetar na liberação de gases do efeito estufa. Por estes motivos, os autores além de expor seus benefícios em diversos âmbitos, enfatizam a urgência em encontrar uma solução alternativa ao uso destes químicos,

caracterizando o produto idealizado como um produto obtido em grandes quantidades, que capture de forma mais eficiente o CO₂, que não afete na saúde do solo e do meio ambiente, que seja capaz de manter ou melhorar os níveis de matéria orgânica, assim mantendo a integridade física, química e biológica do solo que sofrerá sua aplicação.

Já se tem constatado que a aplicação de biochar no solo aumenta o rendimento das culturas e biomassa vegetal (Jeffery *et al.*, 2011), aumenta a capacidade de troca de cátions (CTC) (Liang *et al.*, 2006), eleva a disponibilidade de carbono orgânico e aprimora a atividade microbiana do solo, estimulando os organismos que aumentam a ciclagem de nutrientes do material orgânico (Domene *et al.*, 2014; Martins, 2018; Steiner *et al.*, 2008). Pode aumentar o pH e a CTC do solo (Lehmann *et al.*, 2003), fornece nutrientes direta e indiretamente para as plantas (CHAN *et al.*, 2008), melhora a saturação por bases (Schulz; Glaser, 2012), a disponibilidade de P (Yamato *et al.*, 2006), além de favorecer as interações do solo com a microfauna (Ruivo *et al.*, 2009). O biochar possui capacidade de tamponamento, mantendo o pH sempre na faixa adequada (Buss *et al.*, 2018; Pandit *et al.*, 2018). Entre as características em que o biochar age estão o aumento na porosidade e capacidade de retenção de água, obtendo a capacidade de liberar água no períodos secos, retendo e liberando os íons H⁺ e OH⁻, agindo, dessa forma no controle do pH do solo (Mukherjee *et al.*, 2011; Rezende *et al.*, 2011).

Comumente descreve-se o biochar como melhorador das características do solo, como transportador e adsorvente de nutrientes, como Ca, Fe e Cu, podendo ser uma ferramenta para adsorver contaminantes orgânicos e inorgânicos, metais pesados, pesticidas no solo e atuando na neutralização de compostos fitotóxicos, assim como substâncias tóxicas como alumínio (Al). Ele tem a capacidade de reduzir a lixiviação para os cursos d'água tanto dos poluentes quanto dos nutrientes do solo. Já se obteve resultados positivos do biochar no auxílio do crescimento das plantas, pois pode conter elementos fertilizantes, a depender da sua origem, e opera como um reservatório de liberação lenta de nutrientes no solo, e, como uma importante característica. Possui a capacidade de minimizar o uso de fertilizantes químicos, mantendo a produtividade (Brassard *et al.*, 2016; Kalus *et al.*, 2019; Wardle *et al.*, 1998; Rezende *et al.*, 2011; Lehmann *et al.*, 2011; Kalinke, 2019).

Rezende *et al.* (2011) constataram que o biochar age auxiliando na promoção da estruturação do solo devido às suas ligações químicas com macromoléculas inorgânicas, e age nas demais características físicas do solo como agregação, aeração, elasticidade e permeabilidade. Sabe-se que o biochar influencia na absorção de nutrientes, e para as plantas leguminosas, ele pode alterar a capacidade competitiva com outras plantas, pois pode aumentar o teor de P, K e Mg, além de outros minerais que aumentam a fixação biológica de nitrogênio

(FBN) (Rondon *et al.*, 2007). Segundo Liu *et al.* (2018), em média o biochar aumenta a fixação biológica simbiótica de N₂, melhora a absorção de N pelas plantas, reduz as emissões de N₂O do solo e a lixiviação de N do solo, e promove o crescimento dos fungos micorrízicos (Warnock *et al.*, 1994).

Uma das preocupações atuais são as emissões de gases do efeito estufa, os famosos GEE's. Estes são substâncias gasosas que possuem a capacidade de absorver radiação na frequência infravermelha emitida em grande parte pela superfície terrestre, retendo calor na atmosfera, entre eles estão CO₂ (dióxido de carbono), CH₄ (metano) e N₂O (óxido nitroso), por exemplo (GreenView). Acentuado pelas ações antrópicas, estas emissões resultam no aumento do aquecimento global, que levam às mudanças climáticas que afetam as questões ambientais para a humanidade (Oliveira, 2015). Segundo Nematian *et al.* (2021), a queima de resíduos agrícolas é uma das maiores fontes de emissões de gases estufa (GEE) que levam a impactos negativos à saúde da população e é uma opção de gestão agrícola que além de dar um fim ao resíduo, limpa os campos e controla pragas. Esses autores afirmam que o biochar é uma alternativa para reduzir a queima dos resíduos a céu aberto e criar uma bioeconomia circular para resíduos. Coloca-se que é uma opção benéfica, o biochar tem capacidade de reduzir a rigidez do solo consequentemente minimizando a resistência deste solo a aragem e outras operações, economizando com maquinário e consumo de combustível, além disso agindo na redução das emissões de GEE's como N₂O, CO₂ e CH₄, devido a sua habilidade de reduzir densidade e rigidez do solo (N).

Segundo Panwar *et al.* (2019) e Lehmann & Joseph (2009), o biochar, além de todos os outros benefícios, possui relação com a sustentabilidade e por conta disso, tem papel importante na mitigação de mudanças climáticas e sua aplicação no solo promove alterações que podem prevenir as emissões de gases do efeito estufa além de beneficiar as características do solo. Sua aplicação é um facilitador de armazenamento de carbono no solo já que age como sequestrador eficiente de carbono, ou seja, pode levar a um aumento do estoque de carbono na superfície do solo e atuar como um sumidouro de dióxido de carbono a longo prazo, além de possuir o efeito positivo no rendimento de culturas a curto prazo. Estas afirmações são apoiadas também pela pesquisa de Hays *et al.* (2023). Como característica fundamental no uso do biochar como uma ferramenta de manejo ambiental, apresenta a característica de estabilidade química, pois mantém o carbono contido no biochar no solo e atua com sequestrador de GEE's, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e para o beneficiamento da qualidade do solo e da água (Maia, 2010).

Brassard *et al.* (2016) também afirma que o biochar atua como sequestrador de carbono a longo prazo, podendo durar mais de 1.000 anos, ou seja, o carbono que seria libertado com o CO₂ é impedido, assim reduzindo o impacto global da agricultura nas alterações climáticas. Assim como, também, suprime as emissões de outros GEE 's prejudiciais como o CH₄ e N₂O e, indiretamente, reduz a necessidade do uso de fertilizantes nitrogenados quando o solo sofre sua aplicação (Panwar *et al.*, 2019; Lehmann & Joseph, 2009; Yanai *et al.*, 2007; Lehmann *et al.*, 2003; Glaser, 2007)

Concordando com as ideias de Panwar *et al.* (2019) e Lehmann & Joseph (2009), Ferreira (2023) também guia sua pesquisa no sentido de que o biochar pode substituir os fertilizantes químicos, contribuindo para o sequestro de carbono que se apresenta como alternativa na redução dos GEE 's originados pela agricultura, citando processos como preparo do solo, adubação química ou pela mudança de ocupação do uso do solo ou espaço físico.

Woolf *et al.* (2010), em sua pesquisa, relataram uma redução nas emissões líquidas anuais de CO₂, CH₄ e N₂O com o uso de biochar, devido a sua produção sustentável e posterior aplicação ao solo. Esses autores relatam que o biochar pode contribuir reduzindo em até 12% das atuais emissões antropogênicas de CO₂ e é caracterizado pelo autor como um material importante na desaceleração do aquecimento global e na capacidade de restaurar solos degradados. Conforme Zhang *et al.* (2012), o biochar reduz a emissão de GEE's, entre eles o CO₂, CH₄ e N₂O quando comparado com a aplicação tradicional de esterco.

Em outras pesquisas conduzidas por Zhang *et al.* (2016) houve relatos de que após a aplicação de biochar no solo ocorreu uma melhora na dissipação de gases do efeito estufa e que a emissão de CH₄ do solo foi de 72-80% menor do que nas áreas que não receberam a aplicação de biochar. Já Cayuela *et al.* (2014) obtiveram resultados de que o biochar reduziu a emissão de N₂O dos solos em média de 54%. Maia (2010) traz a visão do biochar como alternativa potencial na fixação do dióxido de carbono no solo para mitigar os impactos negativos do gás na atmosfera, justamente pelas características do biochar de gerar grupos funcionais iônicos que aumentam a importância do mesmo nas trocas iônicas.

Das aplicações revisadas neste tópico, pode-se dizer que em todos os casos o biochar agrega benefícios ao sistema. Por exemplo, devido as características do biochar de fixação de carbono no solo, evita-se a emissão de gás do efeito estufa, sendo uma alternativa eficaz para a redução de emissão pelos agroecossistemas. Enquanto beneficia o ambiente o biochar também pode melhorar a saúde do solo, em suas características físicas, químicas e biológicas, possibilitando o maior rendimento de culturas, e auxiliando na recuperação de solos.

4.2.2 Uso e benefícios na pecuária

O biochar como aditivo alimentar para animais de produção é pouco conhecido, mas os resultados do seu uso como suplementação são positivos, sendo caracterizado como uma solução promissora (Kalus *et al.*, 2019; Schmidt *et al.*, 2017). Mesmo sendo um material pouco conhecido, desde o século passado veterinários alemães vem utilizando o biochar (ativado e não ativado) na saúde animal (Schmidt *et al.*, 2019). A administração terapêutica do biochar está historicamente comprovada há mais de 50 anos e recomendada como cura para numerosos sintomas. Já o seu uso na alimentação, com objetivo de melhorar a produtividade animal, somente começou a ser discutida a partir do ano de 2010. Comumente apresenta efeitos como aumento no consumo de ração, ganho de peso, melhoria na eficiência alimentar, maior produtividade, fortalecimento do sistema imunológico, melhoria na qualidade da carne, decréscimo da poluição provocada por odores, redução de doenças podais e diminuição dos custos veterinários nas diversas produções (Schmidt *et al.*, 2019).

Conforme Mohan *et al.* (2006), o biochar após passar por pirólise e processo de ativação (opcional), que seja química ou física, pode ser aplicado como suplemento alimentar. O uso do biochar é uma forma de beneficiar a saúde dos animais e o desempenho produtivo, aumentando a eficiência alimentar e reduzindo perdas de nutrientes, além disso o biochar pode mitigar as emissões de GEE 's e agir como adsorvente de toxinas (Kalus *et al.*, 2019; Schmidt *et al.*, 2017).

O biochar pode ser oferecido através da adição em misturas diárias na ração ou em cochos de livre acesso no pasto ou estábulo (Schmidt *et al.*, 2019). Pode, também, ser misturado a suplementos populares como melaço (Joseph *et al.*, 2015), ou em blocos de melaço-uréia (Sarooun *et al.*, 2018). Para ruminantes, o biochar se apresenta como uma solução promissora na exploração de alternativas para modular a fermentação ruminal e aumentar a produção animal de forma sustentável devido a diminuição da presença de resíduos químicos na carne e no leite. Além disso, ele serve para auxiliar na redução da resistência das bactérias aos antibióticos (Mirheidari *et al.*, 2020). Assim como, o biochar pode aumentar a eficiência da ração utilizada na produção animal, pois 70% dos custos dos insumos advém da ração e por isso é de grande importância para o sistema que os animais consigam explorar o máximo de seu potencial com a ração fornecida (McGrath *et al.*, 2018).

Em pesquisas que utilizam o biochar como aditivo alimentar, ele demonstrou potencial de mitigar emissões de CH₄ e CO₂ do esterco, mitigar emissões de compostos orgânicos voláteis odoríferos provenientes do estrume, além de fornecer nutrientes que melhoram a saúde, e possibilitam um menor consumo de ração. Um dos grandes benefícios do uso como aditivo alimentar está ligado ao fato de que pode se tornar um fertilizante misto e eficiente de esterco e biochar. Essa mistura fertilizante no solo faz o sequestro de carbono enquanto fertiliza e traz efeitos positivos nos rendimentos de culturas (aumento da oferta forrageira, por exemplo) que são utilizadas na ração animal e assim voltam para o sistema, ou seja, é uma prática que traz benefícios em cadeia (Kalus *et al.*, 2019).

Trabalhos científicos mostram que vacas leiteiras suplementadas com biochar obtiveram resultados positivos na eficiência de supressão do patógeno de *Clostridium-Botulinum*. Esta suplementação foi capaz de reduzir o patógeno pela absorção das toxinas do *C. botulinum* no trato gastrointestinal, sendo uma opção para controlar o botulismo crônico (Schmidt *et al.*, 2019 *apud* Gerlach *et al.*, 2014). Joseph *et al.* (2015) relataram em sua pesquisa que o biochar na alimentação de vacas pode atuar como adsorvente de toxinas e também na transformação da matéria orgânica em carboidratos, açúcares e proteínas no rúmen da vaca, devido a uma liberação de minerais do biochar que será benéfico após as reações ácido-básicas aumentando a reatividade do biochar, então estes grupos funcionais desempenham papel ativo nestas funções. Além disso, o esterco enriquecido com biochar tem apresentado efeito positivo no solo quando incorporado devido a transferência facilitada de nutrientes (principalmente fósforo e nitrogênio) do intestino da vaca para o esterco e do esterco para o solo. Esses autores explicam que o processo se dá pelo enriquecimento do biochar pelos nutrientes orgânicos do trato digestivo do animal, que se preencheram os poros do biochar, tornando a relação com o solo mais eficiente, sendo um importante disponibilizador de nutrientes ao solo. Schmidt *et al.* (2017) corrobora que vacas em pastoreio alimentadas com biochar trazem efeitos secundários positivos para a fertilidade do solo, reduzindo as necessidades de fertilização com N mineral e colaborando na mitigação de GEE 's. Eles apresentam o dado de que se 1% do gado recebesse biochar um total de 1,2% das emissões globais de CO₂ poderia ser compensado. Então, este e outros benefícios citados pelos autores são motivos para que se faça um esforço na investigação científica do biochar. Segundo Yildizli *et al.* (2021), em sua pesquisa *in vitro*, o biochar pode alterar a diversidade microbiana, atuando na saúde dos animais regulando a microbiota intestinal e a inflamação no intestino. Na pesquisa, esses autores apresentaram que a redução na produção de citocinas inflamatórias produzidas por macrófagos no intestino dos animais pode ser atribuída à atividade anti-inflamatória dos biochars.

Conforme Qomariyah *et al.* (2022), o biochar pode ser uma alternativa aos antibióticos e a outros efeitos positivos como aumentar ingestão diária de nutrientes, melhorar a saúde animal, incrementar a eficiência alimentar, reduzir perda de nutrientes e mitigar gases do efeito estufa para o gado. O biochar apresenta também função de tamponante por ter o pH próximo ao da saliva das vacas (Joseph *et al.*, 2015). Assim como foi demonstrado Toth e Dou (2016) em que o biochar na dieta melhora a ingestão de nutrientes, adsorve toxinas e auxilia a saúde animal. Winders *et al.* (2019), relataram que o biochar na dieta de novilhos de terminação aumentou o consumo de matéria seca, melhorou a digestão e reduziu a produção de metano e dióxido de carbono em até 18,4% e 9,9%, respectivamente. Na dieta de animais crescimento, esses autores observaram uma diminuição das emissões de metano em 9,5% de metano e 9,7% de dióxido de carbono. Leng & Preston (2013) demonstrou que o biochar na dieta teve resultados na redução na produção de metano e relatou maior ganho de peso, de até 25% maior em comparação com o grupo controle. Winders *et al.* (2019) e Saleen *et al.* (2018) também relataram redução na produção de CH₄ com a inclusão de biochar na dieta e afirmam que a ingestão pelos animais não foi prejudicada pela presença do material. Tal qual, Hansen *et al.* (2012) afirmam que a utilização do biochar como aditivo pode reduzir a produção *in vitro* de metano no rúmen, entre 11% e 17%, em comparação com tratamento controle no experimento conduzido.

Outra pesquisa conduzida com dietas de engorda de cordeiros obtiveram resultados no aumento do ganho médio diário (GMD), melhora na conversão alimentar e síntese de proteína microbiana. Estes dados levaram a uma conclusão de que o biochar poderia ser incorporado nestas dietas como aditivo de baixo custo com efeitos benéficos de manipulação da fermentação ruminal e melhora na eficiência alimentar resultando em maior desempenho. A explicação que a pesquisa traz para o aumento do peso corporal dos animais é a maior digestibilidade total dos nutrientes e ao aumento da SNM (suprimento de nitrogênio microbiano) ruminal (Mirheidari *et al.*, 2020; Saleem *et al.*, 2018) que possibilitam a maior produção de proteína microbiana e, com o meio equilibrado, a ocorrência de um desenvolvimento mais eficiente dos microrganismos que realizam os processos no rúmen. McFarlane *et al.* (2017) expuseram que o biochar pode melhorar a fermentação ruminal de forragens de qualidade moderada em comparação com forragens de maior qualidade. Erickson *et al.* (2011) indicaram que o biochar melhora a digestibilidade aparente dos nutrientes no trato de vacas alimentadas com silagem de baixa qualidade (com a presença de micotoxinas). Mesmo com uma silagem de baixa qualidade, os animais ainda consumiam e tinham um bom desempenho pela capacidade de desintoxicação do biochar. Os animais que tinham biochar na

dieta apresentaram maior consumo de ração, melhor digestibilidade da fibra em detergente neutro, hemicelulose e proteína bruta e maior teor de gordura no leite em comparação com os animais do grupo controle, sem o biochar. De acordo com Saroeun *et al.* (2018), o gado quando alimentado com blocos de melaço-uréia contendo de 2 a 8% de biochar apresentou melhorias na conversão alimentar.

Assim como no solo, o biochar possui características adsorventes quando utilizado na alimentação animal. Gurtler *et al.* (2014) mencionam que o biochar pode adsorver, no trato digestivo, a bactéria *Escherichia-coli* que pode comprometer a produtividade dos animais e causar problemas no meio ambiente com propagação das mesmas na água e no solo quando adicionado ao esterco. Apoiando estas afirmações McKenzie (1991) e Ka Yan Man *et al.* (2020), reforçam a capacidade de adsorção de uma variedade de toxinas como micotoxinas, toxinas vegetais, pesticidas e metabolitos tóxicos ou patógenos e pode ser considerado uma das formas mais importantes de prevenir efeitos nocivos ou que possam ser fatais de toxinas ingeridas por via oral. Em cordeiros, o biochar permite o consumo de Artemísia, pois com suas características ele absorve terpenos dos arbustos e é capaz de atenuar os efeitos posteriores aversivos dos terpenóides. Ou seja, ele permite a utilização de uma forragem que sem a suplementação do biochar para os animais não poderia ser consumida devido aos seus efeitos colaterais. Com isso, o animal pode ter uma mistura mais diversa de plantas em sua dieta, e controla-la pelo pastejo, visto sua sensibilidade, reduzindo os riscos em áreas propensas a incêndios (Banner *et al.*, 2006).

No leite bovino e ovino, o biochar é capaz de remover de forma eficiente as aflatoxinas. Estas são metabólitos de cepas fungicas tóxicos para humanos e animais que representam perdas econômicas e risco a saúde. O biochar apresenta esta capacidade devido suas características de alta área superficial, tamanho dos poros e afinidade com as moléculas de aflatoxinas (Di Natale *et al.*, 2009; Rao *et al.*, 2001). Em pequenos ruminantes como cabras, a suplementação foi capaz de aumentar o ganho diário, a conversão alimentar, a digestibilidade da matéria seca e orgânica e a retenção de nitrogênio, reduzindo o nitrogênio na urina e o número de ovos de vermes cestodes e oocistos de protozoários coccidia (Silivong *et al.*, 2015; Kana *et al.*, 2011).

Além dos ruminantes, o biochar apresenta efeitos positivos, na produção de animais não ruminantes. Em suínos, pesquisas demonstram que o biochar pode ser utilizado na substituição de antibióticos e na melhoria do crescimento dos animais, sendo considerado um aditivo seguro e alternativo com eficiência na produção animal (Chu *et al.*, 2013). Conforme Evans *et al.* (2017), aves alimentadas com biochar de cama de frango tiveram aumento da

conversão alimentar e redução de patógenos avícolas como *Campylobacter*, *Gallibacterium anatis* e *C. hepaticus*, sendo a suplementação uma alternativa promissora aos antibióticos subterapêuticos (Willson *et al.*, 2019). Nesse sentido, a pesquisa de Prasai *et al.* (2016) citam que o biochar é uma alternativa para indústria avícola para controle da carga de patógenos nos animais sem alterar a complexidade da microbiota intestinal e aumenta a produtividade dos animais. Assim como Kutlu *et al.* (2001) afirmam que galinhas poedeiras suplementadas com biochar tiveram maior produção de ovos, maior peso nos ovos, melhor taxa de conversão alimentar e redução do consumo de ração. Já Mui *et al.* (2006) trazem em sua pesquisa os efeitos do biochar nas carcaças de frango de corte mostrando que o peso corporal vivo e ganho de peso são melhoradas com a suplementação.

Na piscicultura, em espécies como o linguado japonês (*Paralichthys olivaceus*) quando alimentado com biochar aumentou significativamente o ganho de peso, taxa de crescimento, conversão alimentar e taxa de eficiência proteica (Thu *et al.*, 2010). Na produção de carpa comum foi observado melhoria nos parâmetros séricos, na morfologia intestinal, no teor de ácidos graxos, constatando que o biochar pode ser utilizado como aditivo alimentar nesta produção (Mabe *et al.*, 2018).

Pensando na questão da alimentação, há provas de que o biochar beneficia os animais, em sua saúde e desempenho produtivo, nas mais diversas produções, como apresentado. Ainda é uma alternativa barata de suplemento para o sistema, que pode utilizar resíduos produzidos na propriedade ou adquirir o produto pronto para uso. Com a utilização do biochar na alimentação animal também observa-se efeitos no solo e ambiente. No solo pode-se ver este efeito quando o biochar é fornecido para animais a pasto, pois sua mistura com esterco no solo auxilia na fertilidade do mesmo. Ainda na produção animal dispõe da função de ser aditivo de silagem, melhorando a qualidade nutricional e protegendo contra contaminações com microrganismos patogênicos. Ambientalmente, o biochar contribui também para a redução do metano, importante gás do efeito estufa, que com seu efeito mitigador, reduz a produção dentro do rúmen e pode reduzir a emissão quando atua como aditivo de esterco. Além disso, o biochar auxilia a manter a qualidade do esterco para ser usado como fertilizante no solo.

4.2.2.1 Mecanismo de ação no rúmen

Conforme o objetivo desta revisão, procurou-se trazer informações sobre as diversas produções que possuem literatura disponível acerca do uso do biochar. Porém, o foco desta pesquisa é na produção de ruminantes.

Uma das características mais valiosas do biochar para ruminantes está na sua ação no rúmen, que além de melhorar o desempenho dos animais consegue reduzir a produção de metano. O metano é um importante gás do efeito estufa, com um potencial de aquecimento global 25 vezes maior que o do gás carbônico, e ainda possui vida útil na atmosfera de 12 anos (Primavesi *et al.*, 2012). Devido a produção deste gás pelos ruminantes e entendendo a importância do mesmo para o ambiente, torna-se uma prioridade procurar soluções para a sua mitigação. Principalmente, tendo em vista que a produção de ruminantes possui grande escala e previsões de crescimento pelo aumento populacional. Os ruminantes produzem este gás no processo de fermentação ruminal do alimento. Conforme Johnson e Johnson (1995), bovinos podem produzir de 250 a 500 L de metano por dia. Pesquisas vêm buscando produtos ou materiais com características que sejam aceptores de elétrons, pois durante a decomposição microbiana de substâncias orgânicas no trato gastrointestinal, os microrganismos necessitam de um aceptor de elétrons para dar fim aos elétrons excedentes que se acumulam. Esses elétrons podem ser levados para o biofilme, ou através do biofilme. O biofilme é uma colonização das partículas aderidas no rúmen (que são o suprimento de nutrientes para os microrganismos). A opção de os elétrons serem transportados via transportador é mais eficiente, visto que o biofilme possui baixa capacidade de aceitação de elétrons, sendo mais eficiente um mediador (Aeschbacher *et al.*, 2011).

O biochar é conhecido por esta função de mediador inerte (Schimidit *et al.*, 2019; Richter *et al.*, 2009), possuindo condutividade elétrica 100 a 1.000 vezes maior que a dos biofilmes (Aeschbacher *et al.*, 2011). Ainda, o biochar possui a característica de alta porosidade. Essa característica é obtida em seu processamento a partir da liberação de compostos orgânicos voláteis, que permitem a captura de elétrons excedentes nestes poros. Assim sendo, é esperado que com estas características o biochar seja capaz de reduzir a metanogênese, que é o processo de origem do metano. O biochar funciona como uma bateria ou tampão de elétrons que pode ser carregada e descarregada dependendo da necessidade das reações que estiverem acontecendo. No rúmen, as bactérias aceitam ou doam partículas para o biochar (Liu *et al.*, 2012). Para que se tenha este efeito de mediadores de elétrons é necessário que se mantenha um regime alimentar bem equilibrado para o animal. Nas dietas utilizadas na pecuária intensiva, geralmente com alto índice energético, muitas vezes é insuficiente em mediadores de elétrons (Sophal *et al.*, 2013). Quando adicionados a ração de alta energia ocorre uma maior eficiência das reações redox que aumentam o consumo de ração, conforme demonstrado em pesquisas. A produção de metano em bovinos poderia ser reduzida em 20% com a adição de biochar (Leng & Preston, 2013). Essa habilidade pode ainda contribuir com a

maior eficiência alimentar por uma melhor digestão em termos energéticos (Schmidt *et al.*, 2019).

A primeira evidência de que o biochar poderia atuar em mais esta área de acceptor de elétrons e reduzir a produção de metano no rúmen veio do Vietnã em 2012. Segundo Leng *et al.* (2012), além de melhorar o crescimento e conversão alimentar de bovinos, ele reduz a produção de metano em até 22%, e quando testado junto de um aditivo de nitrato o biochar é capaz de reduzir a produção de metano em 41%. Esses autores constataram que adições de 0,5 e 1% de biochar ao líquido ruminal reduziu significativamente a produção de metano em 10 e 12,7% respectivamente, concordando com os resultados de Cabeza *et al.* (2018) de que a produção de metano foi reduzida em todos os tratamentos que conduziu em sua pesquisa.

No artigo de Leng *et al.* (2012), caracterizou o efeito do biochar como uma modificação da fermentação ruminal para minimizar a produção de metano. A hipótese é que esse efeito se dá pelo aumento do habitat microbiano no rúmen, possibilitando a adsorção física de metano e por consequência aumentar a eficiência do crescimento microbiano. Além de promover a alteração da atividade do biofilme, aumentando a população de bactéria metanotrófica que consomem metano e diminuindo as bactérias metanogênicas que são as produtoras (Leng *et al.*, 2012).

Outro ponto é que o uso do biochar na dieta de ruminantes aumenta a eficiência de aminoácidos essenciais que fornecem a energia nos substratos microbianos. Beever e Dracley (2013) afirmam que com a otimização do meio de crescimento microbiano no rúmen há uma melhora na produção dos ruminantes. A utilização do biochar na alimentação aumenta a eficiência de crescimento microbiano através da associação próxima e específica de diferentes espécies de microrganismo.

Conforme Belcher *et al.* (2017) e Silivong *et al.* (2018), este efeito de redução da emissão de metano pode ser explicado pela estrutura altamente porosa do biochar que por consequência aumenta a área de superfície para fixação de microrganismo e facilita o desenvolvimento do biofilme. Além disso, o biochar ainda fornece substâncias benéficas como amido, proteínas e óleos vegetais aos animais. O biochar age como abrigo para o crescimento e propagação dos microrganismos e melhora o sinergismo entre os nutrientes no sistema digestivo do animal. Qomariyah *et al.* (2022) concordam com a ideia da modulação da fermentação ruminal: diminui as emissões de metano, aumenta as bactérias benéficas no trato digestivo, aumenta a eficiência alimentar e deste modo melhora o desempenho do gado. Porém levanta o ponto de que por vezes pode necessitar de aumento da palatabilidade da ração, pois o biochar pode deixar um sabor amargo e reduzir o consumo.

Portanto, como pode-se observar, diversos autores concordam com a ideia de que o biochar possui benefícios na alimentação de ruminantes, tanto na melhora das condições digestivas que culminam na melhoria do desempenho dos animais, como também por apresentar a característica de redução da produção de metano no rúmen. A redução da produção de metano é um ponto bastante importante visto que a sua emissão pode causar problemas ambientais que irão prejudicar as produções agrícolas e animais.

4.3 Ideia do ciclo fechado

Após a leitura de todo o referencial bibliográfico desta revisão, em uma das referências, Nematian *et al.* 2021 é citado a ideia de que a conversão dos resíduos em biochar é uma abordagem sustentável de ciclo fechado com foco em resolver as limitações da gestão de resíduos. Deste modo, foi possível entender que o uso do biochar possibilita que a propriedade se coloque em um ciclo fechado, devido principalmente a gestão de resíduos de forma assertiva. Por exemplo, quando a propriedade possui um rebanho de animais de produção, como bovinos, ovinos ou suínos, estes animais produzem grande quantidade de esterco que na maioria das vezes não tem uma destinação.

No caso de usar o biochar, este esterco pode se transformar em um produto que retorna para o sistema como um aditivo na ração ou em uma suplementação, ou seja, um resíduo que não teria um objetivo ou retorno financeiro dentro da propriedade se torna em um produto de alta eficiência e que traz benefícios ao sistema. Em outros casos, em que a propriedade possui a área agrícola e pecuária em conjunto, os resíduos de ambas podem retornar ao sistema, como aplicação na lavoura ou na alimentação de animais, no lugar de um produto que precisaria ser comprado. O biochar pode chegar no solo de forma indireta após a digestão de animais a pasto. A propriedade também pode estudar a possibilidade de vender seus resíduos para uma empresa que produza o biochar, em casos de não possuir o equipamento ou não ter as condições de processá-lo.

O ambiente é o ator principal para que as produções tenham condições de se manter produtivas. Neste ciclo, além de estar beneficiando os solos e/ou os animais, o biochar ainda impacta positivamente no ambiente.

4.4 Desafios

Diante do exposto, podemos concluir que o biochar apresenta diversos benefícios e sua capacidade de atuar nas diversas áreas apresentadas, especificamente nos agroecossistemas, atuando em todos os ambientes: solo, planta e animal. Por ser um material ainda pouco explorado, existem muitos desafios para sua produção e usos. Constituindo estes desafios, existe uma limitação na produção do biochar quando o objetivo é a produção dentro da fazenda com objetivo de fazer a gestão de resíduos. Sendo assim seu uso prevê a compra ou elaboração de um equipamento próprio que consiga atingir os parâmetros do processo de conversão térmica. Para pequenos produtores torna-se necessário a assessoria de um profissional que conheça o processo, ou que se busque de outra forma o conhecimento de como fazer um equipamento como os citados no tópico de obtenção. Para produtores maiores, ainda há limitações, pois as opções são adquirir o produto pronto para uso. Nos casos onde queiram produzir o biochar na propriedade, é necessário que seja adquirido o maquinário ou que seja feito um projeto para construção de um equipamento. Isso significa que para ambos os casos existe a barreira de ser preciso investir em um equipamento para assim poder produzir o biochar e poder aplicá-lo no sistema, podendo ser um limitador financeiro.

Outra limitação do biochar é a falta de conhecimento anterior a produção dele, ou seja, no momento de identificar as características do resíduo que será transformado em biochar, para que se minimize os riscos para saúde do meio ambiente. Neste sentido existe uma plataforma que indica as práticas da indústria adequadas com padrões ambientais e éticos. Tendo como objetivo obter altos padrões de qualidade no produto para que seja possível o uso seguro do biochar, com foco no uso agrícola, está se chama Iniciativa Internacional Biochar (IBI) que possui objetivo de apoiar o sistema de biochar. Já na Europa existe a EBF (European Biochar Foundation) que é uma instituição sem fins lucrativos e que fornece padrões e diretrizes de qualidade para garantir a fabricação do biochar de forma que leve a um material com propriedades satisfatórias e ambientalmente positiva (Kalus *et al.*, 2019).

Além destas, existe o Certificado Europeu de Biochar, que foi desenvolvido com objetivo de minimizar o risco de contaminação com o uso do biochar e garantir aos clientes um padrão de qualidade confiável, e sendo uma alternativa para os produtores provarem a qualidade e benefícios de seu produto, no caso de vendas. Assim como objetiva incentivar e garantir o controle da produção do biochar, utilizando processos pesquisados e legalmente respaldados, economicamente viáveis e aplicáveis na prática. É um certificado voluntário na Europa, mas obrigatório na Suíça e outros países que alinham o uso com os regulamentos da EBC

(European Biochar Certificate). Esse certificado é utilizado em alguns locais que exigem que o biochar possua certificação para que somente assim possa ser aplicado a solo, ou seja, esta autorização só ocorre perante documento provando que o biochar é seguro e possui qualidade para ser aplicado (Brassard *et al.*, 2016). Conforme Nematian *et al.* (2021), nos Estados Unidos em média existem 35 programas políticos que incentivam financeiramente a produção de biochar. Estes projetos estimulam a aplicação do biochar ao solo e a construção de unidades móveis de pirólise. Segundo a pesquisa de Nematian *et al.* (2021), quando comparou os custos de investimento na produção do biochar (principalmente equipamento para produção) e os ganhos, o resultado foi positivo, justificando o investimento financeiro. O investimento na produção de biochar é, em geral, viável, falando somente em aspectos financeiros, para além dos ganhos com seus benefícios.

Estes programas e ações são de extrema importância na produção de biochar, pois são guias no conhecimento do resíduo a ser utilizado e posterior produção, agindo como apoio para comercialização do produto, passando segurança na produção e uso. Minimizando os riscos de contaminação do solo, plantas e animais por algum composto ou saturar o solo com componentes como Al, Na e Cu, por exemplo, a depender da origem, que podem ser prejudiciais no uso agrícola (Marcelino *et al.*, 2020). Um dos desafios no Brasil é que não existem ações como estas, de incentivo e padrões para a produção do biochar. Por isso, além dos desafios de produção, como a dificuldade de adquirir equipamentos, tem-se o desafio do conhecimento do produto. Na alimentação animal, por exemplo, é de extrema importância conhecer o que está se fornecendo na dieta, como conteúdo nutricional e propriedades. Para alimentação animal, nota-se uma grande falta de diretrizes e padrões para uso. Neste caso, pode ser indicado utilizar estes programas e informações disponíveis como um guia para matérias primas passíveis de uso, processos de produção, padrões e cuidados para minimizar os riscos da aplicação deste produto aos agroecossistemas.

Como exemplo para superar os desafios, Skapa *et al.* (2012) afirmam que o biochar tem sido um empreendimento comercial extremamente lucrativo apesar dos elevados custos fixos e variáveis. O biochar pode ser utilizado na geração de energia, substituindo o carvão, que apresenta lucro mais rápido do que quando aplicado ao solo. Nematian *et al.* (2021), em sua pesquisa, enquadram o biochar no conceito de bioeconomia circular, que diz respeito a transformação e gerenciamento das produções e dos processos industriais, almejando alcançar uma produção sustentável em harmonia com a natureza (SEBRAE). Para isso é preciso que o biochar se torne viável economicamente e seja competitivo em larga escala no setor agrícola. Acrescenta-se a isto a necessidade de oferecer um subsídios à produção de biochar. Para o

produtor seria de extrema importância, pois assim os custos seriam minimizados. Pelo lado dos financiadores, eles poderiam receber de volta seu investimento e mais os rendimentos. Haveriam ganhos, também, com os benefícios gerados no solo, rendimento de culturas, alimentação animal e ambientais.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto, pode-se concluir que o biochar apresenta diversos usos e benefícios comprovados em experimentos de pesquisa. Um dos objetivos desta revisão era disponibilizar uma pesquisa em português sobre o biochar, visto a dificuldade de encontrar material com este conteúdo, sendo grande maioria estrangeira. Assim, no decorrer desta pesquisa foi possível concluir este objetivo, como outros, por exemplo, entregar um documento com conhecimento geral sobre o biochar com foco no uso em agroecossistemas.

Durante esta pesquisa foram explorados assuntos como processos para produção do biochar, diferenças entre matérias-primas, possibilidades de venda do produto e de produção na propriedade. A produção na propriedade permite a formação de um ciclo fechado, culminando na gestão de resíduos de forma consciente. Esta sendo uma visão interessante, pois o biochar dá um fim a um resíduo que por muitas vezes não teria objetivo e também, com o mesmo voltando ao ciclo promove mudanças positivas para os animais, solo e ambiente.

Foi possível demonstrar que o biochar já vem sendo estudado e utilizado na produção animal, que é o foco desta revisão, tanto na alimentação ou na suplementação como em situações indiretas, como aditivo de silagem e esterco. Especificamente nos ruminantes, o uso do biochar já possui efeitos positivos comprovados, atuando na melhoria da saúde dos animais e por consequência melhorando o desempenho produtivo. O biochar beneficia diretamente o solo, atuando em suas características físicas, químicas e biológicas. Indiretamente o biochar, no caso de animais a pasto, pode servir como fertilizante natural quando misturado ao esterco. Quando os animais estão confinados, este produto pode ser vendido como matéria prima para produzir o biochar, ou ser utilizado para produção dentro da propriedade, para posterior aplicação. Em termos de benefícios do meio ambiente, o biochar auxilia na redução da emissão de gases do efeito estufa, principalmente metano, na produção direta dos animais e indireta do esterco armazenado.

Sendo assim, o último objetivo desse trabalho foi cumprido de demonstrar a viabilidade e o potencial do biochar, expressando a capacidade latente de exploração, estimulando que sejam conduzidas mais pesquisas de forma a ampliar o uso do biochar pelos produtores agrícolas.

Foram encontradas algumas limitações pontuais durante o desenvolvimento desta revisão, uma delas já foi citada, como a dificuldade de encontrar material sobre o biochar em português, para além disso nota-se uma falta no desenvolvimento das explicações sobre o mecanismo de funcionamento do biochar, sendo brevemente explorados. Também, são escassos, os conteúdos sobre o uso na produção animal das diversas espécies, junto dos esclarecimentos de forma objetiva de seus benefícios. E ainda hoje, existe uma exploração maior do material para uso agrícola dentro dos agroecossistemas. Observa-se por fim uma falta de programas ou ações que guiem os produtores ao conhecimento e uso consciente do biochar, apresentando-se como um desafio na aceitação dos benefícios do produto. Em relação aos custos de implantação e produção do biochar os materiais também são limitados, este ponto ainda está em processo de desenvolvimento, assim seria interessante que futuramente existissem materiais considerando todo o processo de produção (Marcelino *et al.*, 2020). Provavelmente assim, seguindo estas recomendações possamos ter maiores informações sobre o biochar para que possa ser elaborado métodos para repassar as mesmas aos produtores, com objetivo do biochar adquirir maior importância, credibilidade e visibilidade, atingindo mais produtores que farão a produção em si ou utilizarão o produto acarretando em todos os benefícios descritos nesta revisão.

REFERÊNCIAS

- AESCHBACHER, Michael *et al.* Electrochemical analysis of proton and electron transfer equilibria of the reducible moieties in humic acids. **Environmental Science & Technology**, Easton, v. 45, n. 19, p. 8385-8394, 2011.
- ALMEIDA, Aline Rafaela *et al.* Remoção de microcistina-LR da *Microcystis aeruginosa* utilizando bagaço de cana-de-açúcar in natura e carvão ativado. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 11, p. 188-197, 2016.
- BAI, Y *et al.* Biochar from pyrolyzed Tibetan Yak dung as a novel additive in ensiling sweet sorghum: an alternate to the hazardous use of Yak dung as a fuel in the home. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 403, p. 1-10, 2021.
- BANNER, R. E. *et al.* Supplemental barley and charcoal increase intake of sagebrush by lambs. **Journal of Range Management**, Denver, v. 53, n. 4, p. 1-6, 2000.
- BAPAT, Harshavardhan; MANAHAN, Stanley E.; LARSEN, David W. An activated carbon product prepared from milo (*Sorghum vulgare*) grain for use in hazardous waste gasification by ChemChar cocurrent flow gasification. **Chemosphere**, Oxford, v. 39, n. 1, p. 23-32, 1999.
- BATISTA, E. M. C. C. *et al.* Effect of surface and porosity of biochar on water holding capacity aiming indirectly at preservation of the Amazon biome. **Scientific Reports**, London, v. 8, n. 1, [art.] 10677, [p. 1-9], 2018.
- BEEVER, D. E.; DRACKLEY, J. K. Optimization of feed use efficiency in ruminant production systems. *In*: MAKKAR, H. P. S.; BEEVER, D. (ed.). **Proceedings of the FAO Symposium, 27 November 2012, Bangkok, Thailand**. Rome: FAO, 2013. Cap. 6, p. 75-92.
- BELCHER, R. W. *et al.* **Biochars for use with animals**. Depositor: Carbon Technology Holdings LLC. US n. 20170196812A1. Deposit: 30 Jan. 2017. Concession: 13 July 2017.
- BENITES, V. M. *et al.* Utilização de carvão e subprodutos da carbonização vegetal na agricultura: aprendendo com as Terras Pretas de Índio. *In*: TEIXEIRA, W. G. *et al.* (ed.). **As Terras Pretas de Índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. p. 285-296.
- BOURKE, J. *et al.* Do all carbonized charcoals have the same chemical structure? 2. A model of the chemical structure of carbonized charcoal. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, DC, v. 46, n. 18, p. 5954-5967, 2007.
- BRASSARD, Patrick; GODBOUT, Stéphane; RAGHAVAN, Vijaya. Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: key parameters and mechanisms involved. **Journal of Environmental Management**, New York, v. 181, p. 484-497, 2016.

BUSS, W. *et al.* Spatial and temporal microscale pH change at the soil-biochar interface. **Geoderma**, Amsterdam, v. 331, p. 50-52, 2018.

CABEZA, I. *et al.* Effect of biochar produced from different biomass sources and at different process temperatures on methane production and ammonia concentrations in vitro. **Animal Feed Science and Technology**, Amsterdam, v. 237, p. 1-7, 2018.

CAYUELA, M. L. *et al.* Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: a review and meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 191, p. 5-16, 2014.

CHU, Gyo Moon *et al.* Effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar as antibiotic alternatives on growth performance, immune responses and fecal microflora population in fattening pigs. **Animal Science Journal**, Richmond, v. 84, n. 2, p. 113-120, 2013.

CONTE, P. *et al.* Recent developments in understanding biochar's physical-chemistry. **Agronomy**, Basel, v. 11, n. 4, p. 1-41, 2021.

DI NATALE, Francesco; GALLO, M.; NIGRO, Roberto. Adsorbents selection for aflatoxins removal in bovine milks. **Journal of Food Engineering**, London, v. 95, n. 1, p. 186-191, 2009.

DING, Y. *et al.* Biochar to improve soil fertility. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, Les Ulis, v. 36, p. 1-18, 2016.

DOMENE, X. *et al.* Medium-term effects of corn biochar addition on soil biota activities and functions in a temperate soil cropped to corn. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 72, p. 152-162, 2014.

ERICKSON, Peter S.; WHITEHOUSE, Nancy L.; DUNN, M. L. Activated carbon supplementation of dairy cow diets: Effects on apparent total-tract nutrient digestibility and taste preference. **The Professional Animal Scientist**, Champaign, v. 27, n. 5, p. 428-434, 2011.

EUROPEAN BIOCHAR CERTIFICATION. **The European Biochar Certificate (EBC)**. Arbaz: EBC, [2024]. Disponível em: <https://www.european-biochar.org/en>. Acesso em: 10 jan. 2024.

EVANS, A. M.; BONEY, J. W.; MORITZ, J. S. The effect of poultry litter biochar on pellet quality, one to 21 d broiler performance, digesta viscosity, bone mineralization, and apparent ileal amino acid digestibility. **Journal of Applied Poultry Research**, Oxford, v. 26, n. 1, p. 89-98, 2017.

FERREIRA, Kamila Daniele de Resende. **Características agronômicas do feijão-caupi e bioindicadores de qualidade do solo após aplicação de biochar de resíduos animais**. 2022. 46 f. Dissertação (Mestrado em produção Vegetal) - Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2022.

FERREIRA, Maria Laura Harada. **Biochar**: estado da arte do uso agrícola no cenário brasileiro. 2023. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2023.

GERLACH, H. *et al.* Oral application of charcoal and humic acids to dairy cows influences *Clostridium botulinum* blood serum antibody level and glyphosate excretion in urine. **Journal of Clinical Toxicology**, Sunnyvale, v. 5, p. 256-262, 2014.

GLASER, Bruno. Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, London, v. 362, n. 1478, p. 187-196, 2007.

GREENVIEW. **Gases de Efeito Estufa (GEE)**. São Paulo: Greeview Engenharia & Consultoria Ambiental, © 2023. Disponível em: <https://greenviewgv.com.br/gases-de-efeito-estufa/>. Acesso em: 10 jan. 2024.

GURTLER, J. B. *et al.* Inactivation of E. coli O157: H7 in cultivable soil by fast and slow pyrolysis-generated biochar. **Foodborne Pathogens and Disease**, Larchmont, v. 11, n. 3, p. 215-223, 2014.

HALE, S. E. *et al.* The sorption and desorption of phosphate-P, ammonium-N and nitrate-N in cacao shell and corn cob biochars. **Chemosphere**, Oxford, v. 91, n. 11, p. 1612-1619, 2013.

HANSEN, H. H.; STORM, I. M. L. D.; SELL, A. M. Effect of biochar on in vitro rumen methane production. **Acta Agriculturae Scandinavica: Section A—Animal Science**, Stockholm, v. 62, n. 4, p. 305-309, 2012.

HAYS, K. N. *et al.* Tillage, manure, and biochar short-term effects on soil characteristics in forage systems. **Agronomy**, Basel, v. 13, n. 9, p. 1-23, 2023.

HENAN OLTEN ENVIRONMENTAL SCI-TECH. **Continuous carbonization machine**. Jianzou City: Henan Olten Environmental SCI-TECH, ©2019. Disponível em: https://www.oltenscharcoalmachine.com/products/Continuous_Carbonization_Machine.html?campaignid=15779671848&adgroupid=130529818694&feeditemid=&targetid=kwd-798011732536&device=c&creative=573061709450&keyword=biochar%20pyrolysis%20equipment&gclid=CjwKCAjwmbqoBhAgEiwACIjzEFZwUl661E1Fm_QLWa1QHz9DuZc5PHR204F-AqjBQhxRd_hy8zZlihoCUkwQAvD_BwE. Acesso em: 10 jan. 2024.

JEFFERY, S. *et al.* A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 144, n. 1, p. 175-187, 2011.

JOHNSON, K. A; JOHNSON, D. E. Methane emissions from cattle. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 73, n. 8, p. 2483–2492, 1995.

JOSEPH, S. *et al.* **Feeding biochar to cows: an innovative solution for improving soil fertility and farm productivity**. *Pedosphere*, Beijing, v. 25, n. 5, p. 666-679, 2015.

KALINKE, Cristiane. **Biochar quimicamente ativado: obtenção, caracterização e aplicação no desenvolvimento de sensores eletroquímicos.** 2019. 218 f. Tese (Doutorado em Química Analítica) - Programa de Pós-Graduação em Química, Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

KALUS, Kajetan; KOZIEL, Jacek A.; OPALIŃSKI, Sebastian. A review of biochar properties and their utilization in crop agriculture and livestock production. **Applied Sciences**, Basel, v. 9, n. 17, p. 1-16, 2019.

KANA, J. R. *et al.* Growth performance and carcass characteristics of broiler chickens fed diets supplemented with graded levels of charcoal from maize cob or seed of *Canarium schweinfurthii* Engl. **Tropical Animal Health and Production**, Edinburgh, v. 43, p. 51-56, 2011.

KIZITO, S. *et al.* Role of nutrient-enriched biochar as a soil amendment during maize growth: exploring practical alternatives to recycle agricultural residuals and to reduce chemical fertilizer demand. **Sustainability**, Basel, v. 11, n. 11, p. 1-22, 2019.

KUTLU, Hasan Rüstü; ÜNSAL, İlknur; GÖRGÜLÜ, Murat. Effects of providing dietary wood (oak) charcoal to broiler chicks and laying hens. **Animal Feed Science and Technology**, Amsterdam, v. 90, n. 3/4, p. 213-226, 2001.

LEHMANN, J. *et al.* Biochar effects on soil biota—a review. **Soil biology and biochemistry**, Amsterdam, v. 43, n. 9, p. 1812-1836, 2011.

LEHMANN, Johannes. Bio-energy in the black. **Frontiers in Ecology and the Environment**, Washington, DC, v. 5, n. 7, p. 381-387, 2007.

LEHMANN, Johannes; JOSEPH, Stephen (ed.). **Biochar for environmental management: science, technology and implementation.** New York: Routledge, 2015.

LENG, R. A.; INTHAPANYA, S.; PRESTON, T. R. All biochars are not equal in lowering methane production in in vitro rumen incubations. **Livestock Research for Rural Development**, Cali, v. 25, n. 6, [art.] 106, 2013.

LENG, R. A. *et al.* Biochar reduces enteric methane and improves growth and feed conversion in local “Yellow” cattle fed cassava root chips and fresh cassava foliage. **Livestock Research for Rural Development**, Cali, v. 24, n. 11, p. 1-7, 2012.

LENG, R. A. Interactions between microbial consortia in biofilms: a paradigm shift in rumen microbial ecology and enteric methane mitigation. **Animal Production Science**, Melbourne, v. 54, n.5, p. 519-543, 2014.

LI, J. *et al.* Comparative study for microcystin-LR sorption onto biochars produced from various plant-and animal-wastes at different pyrolysis temperatures: influencing mechanisms of biochar properties. **Bioresource Technology**, Barking, v. 247, p. 794-803, 2018.

- LIANG, B. *et al.* Black carbon increases cation exchange capacity in soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n. 5, p. 1719-1730, 2006.
- LIU, F. *et al.* Promoting direct interspecies electron transfer with activated carbon. **Energy & Environmental Science**, Cambridge, v. 5, n. 10, p. 8982-8989, 2012.
- LIU, Qi *et al.* How does biochar influence soil N cycle? A meta-analysis. **Plant and Soil**, The Hague, v. 426, p. 211-225, 2018.
- MABE, L. T. *et al.* The effect of dietary bamboo charcoal supplementation on growth and serum biochemical parameters of juvenile common carp (*Cyprinus carpio* L.). **Aquaculture Research**, Oxford, v. 49, n. 3, p. 1142-1152, 2018.
- MAGALHÃES, Laura Soares; SOLA, Marília Cristina. Identificação de aflatoxinas no leite e produtos lácteos: revisão de literatura. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 10, n. 8, [art.] e50510817586, [p. 1-7], 2021.
- MAIA, C. M. B. F. **Finos de carvão: fonte de carbono estável e condicionador de solos**. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2010.
- MAN, K. Y. *et al.* Use of biochar as feed supplements for animal farming. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, Boca raton, v. 51, n. 2, p. 187-217, 2021.
- MARTINS, Caroline Cândida. **Biochar, composto orgânico e potássio nas características químicas e lixiviação de nutrientes em espodossolo e no cultivo de mucuna preta e moringa**. 2018. 126 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2018.
- MAURER, D. L. *et al.* Pilot-scale testing of non-activated biochar for swine manure treatment and mitigation of ammonia, hydrogen sulfide, odorous volatile organic compounds (VOCs), and greenhouse gas emissions. **Sustainability**, Basel, v. 9, n. 6, p. 1-17, 2017.
- MCFARLANE, Z. D. *et al.* Effect of biochar type and size on in vitro rumen fermentation of orchard grass hay. **Agricultural Sciences**, Irvine, v. 8, n. 4, p. 316-325, 2017.
- MCGRATH, J. *et al.* Nutritional strategies in ruminants: a lifetime approach. **Research in Veterinary Science**, London, v. 116, p. 28-39, 2018.
- MCKENZIE, R. A. Bentonite as therapy for Lantana camara poisoning of cattle. **Australian Veterinary Journal**, Oxford, v. 68, n. 4, p. 146-148, 1991.
- MCLENNAN, M. W.; AMÓS, M. L. Treatment of lantana poisoning in cattle. **Australian Veterinary Journal**, Oxford, v. 66, n. 3, p. 93-94, 1989.

- MIRHEIDARI, A. *et al.* Effects of biochar produced from different biomass sources on digestibility, ruminal fermentation, microbial protein synthesis and growth performance of male lambs. **Small Ruminant Research**, Amsterdam, v. 183, p. 1-6, 2020.
- MOHAN, Dinesh; PITTMAN, Charles U. Jr.; STEELE, Philip H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. **Energy & Fuels**, Washington, DC, v. 20, n. 3, p. 848-889, 2006.
- MUI, N. T. *et al.* Effect of method of processing foliage of *Acacia mangium* and inclusion of bamboo charcoal in the diet on performance of growing goats. **Animal Feed Science and Technology**, Amsterdam, v. 130, n. 3/4, p. 242-256, 2006.
- MUKHERJEE, A.; ZIMMERMAN, A. R.; HARRIS, W. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. **Geoderma**, Amsterdam, v. 163, n. 3/4, p. 247-255, 2011.
- NEMATIAN, Maryam; KESKE, Catherine; NG'OMBE, John N. A techno-economic analysis of biochar production and the bioeconomy for orchard biomass. **Waste Management**, New York, v. 135, p. 467-477, 2021.
- NIRAULA, S. *et al.* Dairy effluent-saturated biochar alters microbial communities and enhances bermudagrass growth and soil fertility. **Agronomy**, Basel, v. 11, n. 9, p. 1-14, 2021.
- OH, Seok-Young; SEO, Yong-Deuk. Sorption of halogenated phenols and pharmaceuticals to biochar: affecting factors and mechanisms. **Environmental Science and Pollution Research**, Berlin, v. 23, p. 951-961, 2016.
- OLIVEIRA, Patrícia Perondi Anchão. Gases de efeito estufa em sistemas de produção animal brasileiros e a importância do balanço de carbono para a preservação ambiental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 8, p. 623-634, 2015.
- PANDIT, N. R. *et al.* Multi-year double cropping biochar field trials in Nepal: finding the optimal biochar dose through agronomic trials and cost-benefit analysis. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 637, p. 1333-1341, 2018.
- PANWAR, N. L.; PAWAR, Ashish; SALVI, B. L. Comprehensive review on production and utilization of biochar. **SN Applied Sciences**, London, v. 1, [art.] 168, [p. 1-19], 2019.
- PEREIRA, Ellen Jessica Monteiro. **Remoção de metais de solução aquosa usando biochar e biomassa seca de planta aquática**. 2020. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2020.
- PEREIRA, R. C. *et al.* Assessment of the influence of biochar on rumen and silage fermentation: a laboratory-scale experiment. **Animal Feed Science and Technology**, Amsterdam, v. 196, p. 22-31, 2014.

PRASAI, T. P. *et al.* Biochar, bentonite and zeolite supplemented feeding of layer chickens alters intestinal microbiota and reduces campylobacter load. **PLoS One**, San Francisco, v. 11, n. 4, [art.] e0154061, 2016.

PRIMAVESI, O. M. A. S. P. R. *et al.* Produção de gases de efeito estufa em sistemas agropecuários: bases para inventário de emissão de metano por ruminantes. *In*: LIMA, M. A. *et al.* (ed.). **Estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira**. Brasília, DF: Embrapa, 2012. p. 239-270.

QOMARIYAH, N. *et al.* Dietary biochar as a feed additive for increasing livestock performance: a meta-analysis of in vitro and in vivo experiment. **Czech Journal of Animal Science**, Praha, v. 68, n. 2, p. 72-86, 2023.

RAO, SB Nageswara; CHOPRA, R. C. Influence of sodium bentonite and activated charcoal on aflatoxin M1 excretion in milk of goats. **Small Ruminant Research**, Amsterdam, v. 41, n. 3, p. 203-213, 2001.

REZENDE, E. I. P. *et al.* Biocarvão (Biochar) e sequestro de carbono. **Revista Virtual de Química**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 5, p. 426-433, 2011.

RICHTER, H. *et al.* Cyclic voltammetry of biofilms of wild type and mutant *Geobacter sulfurreducens* on fuel cell anodes indicates possible roles of OmcB, OmcZ, type IV pili, and protons in extracellular electron transfer. **Energy & Environmental Science**, Cambridge, v. 2, n. 5, p. 506-516, 2009.

RONDON, M. A. *et al.* Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 43, p. 699-708, 2007.

SAATH, Kleverton Clovis de Oliveira; FACHINELLO, Arlei Luiz. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, DF, v. 56, p. 195-212, 2018.

SALEEM, A. M. *et al.* Effect of engineered biocarbon on rumen fermentation, microbial protein synthesis, and methane production in an artificial rumen (RUSITEC) fed a high forage diet. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 96, n. 8, p. 3121-3130, 2018.

SALES, Cristina Aparecida Vilas Bôas; ANDRADE, Rubenildo Vieira; LORA, Electo Eduardo Silva. Geração de eletricidade a partir da gaseificação de biomassa. **Biomassa & Energia**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 195-204, 2005.

SAROEUN, Kong; PRESTON, T. R.; LENG, R. A. Rice distillers' byproduct and molasses-urea blocks containing biochar improved the growth performance of local Yellow cattle fed ensiled cassava roots, cassava foliage and rice straw. **Livestock Research for Rural Development**, Cali, v. 30, n. 3, p. 3, 2018.

SCHMIDT, Hans-Peter *et al.* Fourfold increase in pumpkin yield in response to low-dosage root zone application of urine-enhanced biochar to a fertile tropical soil. **Agriculture**, Basel, v. 5, n. 3, p. 723-741, 2015.

SCHMIDT, Hans-Peter *et al.* The use of biochar in animal feeding. **PeerJ**, Corte Madera, v. 7, p. 1-54, 2019.

SCHMIDT, Hans Peter; TAYLOR, Paul. Kon-Tiki flame curtain pyrolysis for the democratization of biochar production. **The Biochar Journal**, Arbaz, v. 1, p. 14-24, 2014.

SCHMIDT, Hans-Peter; WILSON, Kelpie; KAMMANN, Claudia. Using biochar in animal farming to recycle nutrients and reduce greenhouse gas emissions. *In*: EUROPEAN GEOSCIENCES UNION. GENERAL ASSEMBLY - EGU2017, 19., 2017, Vienna, Austria. **Proceeding of the [...]**. Munich: EGU, 2017. v. 19, [pôster] 5719.

SEBRAE - SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **O que é a bioeconomia circular**. [Brasília, DF]: SEBRAE, 11 fev. 2023. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/o-que-e-a-bioeconomia-circular,760d6f102af94810VgnVCM100000d701210aRCRD#:~:text=Uma%20bioeconomia%20circular%20prop%C3%B5e%20a,e%20perda%20de%20recursos%20naturais>. Acesso em: 10 jan. 2024.

SILIVONG, P. *et al.* Brewers' grains (5% of diet DM) increases the digestibility, nitrogen retention and growth performance of goats fed a basal diet of *Bauhinia acuminata* and foliage from cassava (*Manihot esculenta* Crantz) or water spinach (*Ipomoea aquatica*). **Livestock Research for Rural Development**, Cali, v. 30, n. 3, [art.] 55, 2018.

SILIVONG, P. *et al.* Growth performance of goats was improved when a basal diet of foliage of *Bauhinia acuminata* was supplemented with water spinach and biochar. **Livestock Research for Rural Development**, Cali, v. 27, n. 3, [art.] 58, 2015.

SIVILAI, B. *et al.* Rice distillers' byproduct and biochar as additives to a forage-based diet for growing Moo Lath pigs; effects on growth and feed conversion. **Livestock Research for Rural Development**, Cali, v. 30, n. 6, [art.] 111, 2018.

SKAPA, S. Investment characteristics of natural monopoly companies. **Journal of Competitiveness**, Zlín, v. 4, n. 1, p. 1-8, 2012.

SOPHAL, C. *et al.* Nitrate replacing urea as a fermentable N source decreases enteric methane production and increases the efficiency of feed utilization in Yellow cattle. **Livestock Research for Rural Development**, Cali, v. 25, n. 7, [art.] 113, 2013.

STEINBEISS, S.; GLEIXNER, G.; ANTONIETTI, M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 41, n. 6, p. 1301-1310, 2009.

STEINER, C. *et al.* Soil respiration curves as soil fertility indicators in perennial central Amazonian plantations treated with charcoal, and mineral or organic fertilisers. **Tropical Science**, Oxford, v. 47, n. 4, p. 218–230, 2007.

STEINER, C. *et al.* Participatory trials of on-farm biochar production and use in Tamale, Ghana. **Agronomy for Sustainable Development**, Les Ulis, v. 38, p. 1-10, 2018.

TAGGART, C. B. *et al.* Impacts of biochar on *Trifolium incarnatum* and *Lolium multiflorum*: soil nutrient retention and loss in sandy loam amended with dairy manure. **Agronomy**, Basel, v. 13, n. 1, [art.] 26, 2022.

TAN, Xiao-fei *et al.* Biochar-based nano-composites for the decontamination of wastewater: a review. **Bioresource Technology**, Barking, v. 212, p. 318-333, 2016.

THU, M. *et al.* Effects of supplementation of dietary bamboo charcoal on growth performance and body composition of juvenile Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*. **Journal of the World Aquaculture Society**, Baton Rouge, v. 41, p. 255-262, 2010.

TOTH, J. D.; DOU, Z. Use and impact of biochar and charcoal in animal production systems. **Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers**, Madison, v. 63, p. 199-224, 2016.

WARDLE, D. A.; ZACKRISSON, O.; NILSSON, M.-C. The charcoal effect in Boreal forests: mechanisms and ecological consequences. **Oecologia**, Berlin, v. 115, p. 419-426, 1998.

WARNOCK, D. Daniel. Mycorrhizal responses to biochar in soil—concepts and mechanisms. **Plant Soil**, The Hague, v. 300, p. 9-20, 2007.

WILLSON, Nicky-Lee *et al.* Feed supplementation with biochar may reduce poultry pathogens, including *Campylobacter hepaticus*, the causative agent of spotty liver disease. **PLoS One**, San Francisco, v. 14, n. 4, [art.] e0214471, 2019.

WINDERS, T. M. *et al.* Evaluation of the effects of biochar on diet digestibility and methane production from growing and finishing steers. **Translational Animal Science**, Oxford, v. 3, n. 2, p. 775-783, 2019.

WOOLF, D. *et al.* Sustainable biochar to mitigate global climate change. **Nature Communications**, London, v. 1, [art.] 56, 2010.

YAO, Y. *et al.* Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. **Chemosphere**, Oxford, v. 89, n. 11, p. 1467-1471, 2012.

YILDIZLI, Gizem; CORAL, Gokhan; AYAZ, Furkan. Biochar as a biocompatible mild anti-inflammatory supplement for animal feed and agricultural fields. **Chemistry & Biodiversity**, Zurich, v. 18, n. 6, [art.] e2001002, 2021.

ZHENGZHOU JIUTIAN MACHINERY. **Biochar making machine**. Zhengzhou: Zhengzhou Jiutian Machinery Equipment, © 2024. Disponível em: https://www.charcoal-plant.com/product/continuous/19.html?g=g&keyword=&matchtype=&creative=673663184628&device=c&20538223155=20538223155&target=&placement=&gclid=CjwKCAjwmbqoBhAgEiwACIjzEHVuXWkaK4raSGKALVU8MeuDK-XFUAC5Zfx9Vt7ehlQGvBzo46cophoCAhwQAvD_BwE. Acesso em: 10 jan. 2024.

ZHANG, A. *et al.* Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: a field study of 2 consecutive rice growing cycles. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 127, p. 153-160, 2012.

ZHANG, S. *et al.* Hydrothermal carbonization for hydrochar production and its application. In: OK, Y. S. *et al.* (ed.). **Biochar from biomass and waste: fundamentals and applications**. Amsterdam: Elsevier, 2019. Cap. 15, p. 275–294.

ZHANG, Y. *et al.* Annual accounting of net greenhouse gas balance response to biochar addition in a coastal saline bioenergy cropping system in China. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 158, p. 39-48, 2016.