

William Gleidson Alves Torres

**Biocarvões de casca de arroz e de esterco bovino como condicionadores de solo para a
produção do feijoeiro**

Montes Claros

2021

William Gleidson Alves Torres

Biocarvões de casca de arroz e de esterco bovino como condicionadores de solo para a produção do feijoeiro

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal.

Orientador: Luiz Arnaldo Fernandes

Montes Claros
Janeiro de 2021

Torres, William Gleidson Alves.

T693b
2021

Biocarvões de casca de arroz e de esterco bovino como condicionadores de solo para a produção do feijoeiro / William Gleidson Alves Torres. Montes Claros, 2021. 68 f.: il.

Tese (doutorado) - Área de concentração em Produção Vegetal. Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador(a): Luiz Arnaldo Fernandes.

Banca examinadora: Luiz Arnaldo Fernandes, Leidivan Almeida Frazão, Fernando Colen, Reginaldo Arruda Sampaio, Michele Xavier Vieira Megda, Fabiano Barbosa de Souza Prates.

Inclui referências.

1. Calagem dos solos. 2. Feijão-comum. 3. Fósforo. I. Fernandes, Luiz Arnaldo. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 633.35

ATA DE DEFESA DE TESE

Aos 29 dias do mês de janeiro de 2021, às 14:00 horas, sob a Presidência do Professor Luiz Arnaldo Fernandes, D. Sc. (Orientador - ICA/UFMG) e com a participação dos Professores Leidivan Almeida Frazão, D. Sc. (ICA/UFMG), Fernando Colen, D. Sc. (ICA/UFMG), Reginaldo Arruda Sampaio, D. Sc. (ICA/UFMG), Michele Xavier Vieira Megda, D. Sc. (Unimontes) e Fabiano Barbosa de Souza Prates, D. SC. (IF-Alagoas), reuniu-se, por videoconferência, a Banca de tese de William Gleidson Alves Torres, aluno do Curso de Doutorado em Produção Vegetal. O resultado da defesa de tese intitulada: "Biocarvões de casca de arroz e de esterco bovino como condicionadores de solo para a produção do feijoeiro", sendo o aluno considerado APROVADO. E, para constar, eu, Professor Luiz Arnaldo Fernandes, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.

OBS.: O aluno somente receberá o título após cumprir as exigências do ARTIGO 68 do regulamento do Curso de Doutorado em Produção Vegetal, conforme apresentado a seguir:

Art. 68 Para dar andamento ao processo de efetivação do grau obtido, o candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação ou Tese e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do Colegiado do Programa, com a anuência do orientador, no mínimo 3 (três) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação ou, 4 (quatro) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da tese, no prazo de 60 (sessenta) dias.

Montes Claros, 29 de janeiro de 2021.



Luiz Arnaldo Fernandes
Orientador



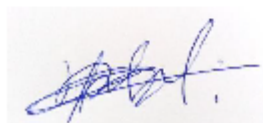
Leidivan Almeida Frazão
Membro



Fernando Colen
Membro



Reginaldo Arruda Sampaio
Membro



Michele Xavier Vieira Megda
Membro



Fabiano Barbosa de Souza Prates
Membro

A Deus, por cada dia de vida e por me proporcionar conquistas as quais foram um dia meros sonhos.

Aos meus pais, Milton e Leoní e aos irmãos Warlen e Débora, pelas palavras de incentivo e pelo apoio de toda uma vida.

Á Helainy por toda a parceria, incentivo e por estar comigo nos momentos mais laboriosos desta caminhada.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Minas Gerais, em especial, ao Instituto de Ciências Agrárias que foi a minha casa por uma década, por sua substancial importância ao processo transformador da educação, do qual tive a oportunidade de fazer parte.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão de recurso financeiro para realização do projeto de pesquisa.

Ao Professor Luiz Arnaldo Fernandes, por todo o apoio, ajuda e suporte, em todas as etapas deste trabalho, minha gratidão, admiração e respeito.

Aos Professores Reginaldo Arruda Sampaio e Fernando Colen pelo suporte durante as análises laboratoriais.

Aos colegas servidores técnico-administrativos em Educação da UFMG: Jailson Ramos de Magalhães e Rachel Bragança de Carvalho Mota que se fizeram amigos ao longo dessa caminhada.

À Fernanda Mara Cunha Freitas pela atenção recebida e apoio.

Aos membros da banca, e a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse possível.

Muito obrigado!

“O solo fértil da mente humana pode germinar qualquer ideia ou pensamento, cabe a nós, os agricultores da vida, ter a sabedoria para plantar a semente adequada e cultivá-la de modo que ela cresça e floresça o melhor de cada um de nós”.

(Thomás Fioreze)

BIOCARVÕES DE CASCA DE ARROZ E DE ESTERCO BOVINO COMO CONDICIONADORES DE SOLO PARA A PRODUÇÃO DO FEIJOEIRO

RESUMO

O aproveitamento de resíduos orgânicos oriundos da agropecuária na forma de biochar pode ser uma alternativa viável tanto no processo de gestão das biomassas geradas quanto na reciclagem dos nutrientes contidos nestes resíduos. Desse modo, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de biochars produzidos, a partir do esterco bovino e da casca de arroz, nas propriedades químicas do solo e na produção do feijoeiro. Para isso, foram conduzidos dois experimentos, ambos em casa de vegetação em delineamento inteiramente casualizado. O primeiro experimento foi em esquema fatorial $4 \times 2 + 3$, com quatro repetições, sendo os tratamentos quatro doses de biochar (1, 2, 3 e 4% (m/v, massa do condicionador/volume de solo), dois biochars (biochar de esterco bovino leiteiro - BEB e biochar de casca de arroz - BCA) e três tratamentos adicionais (C1, sem calagem e sem fertilização; C2, adição de carbonato de Ca e Mg (P.A) e fertilizantes N, P, K e; C3, adição de silicato de Ca e Mg e fertilizantes N, K). O segundo experimento foi em esquema fatorial $2 \times 2 \times 2 + 1$, com oito repetições, sendo dois tipos de biochar (BEB) e BCA), na dose 4% (m/v), sem e com corretivos da acidez (adição de carbonato de cálcio e carbonato de magnésio, sem e com fósforo e um tratamento controle (sem adição de biochar, corretivos da acidez e fósforo). No primeiro experimento, nas amostras de solo de cada vaso, coletadas após 20 dias de incubação com os tratamentos (primeira etapa), foram realizadas as seguintes análises: carbono total, pH em água; fósforo extraído pela solução de Mehlich 1 e quantificado por colorimetria com molibdato de amônio; fósforo extraído por solução de Mehlich 1 e por resina de troca iônica e quantificado por espectrometria (espectrometria de massa indutivamente acoplado - ICP-MS/MS); alumínio, cálcio e magnésio trocáveis; capacidade de troca catiônica; saturação por bases e silício solúvel. No segundo experimento, nas amostras de solo de cada vaso, coletadas após 30 dias de incubação com os tratamentos, determinaram-se o carbono total (CT); nitrogênio total (NT); pH em água; fósforo extraído por Mehlich 1; alumínio (acidez trocável); cálcio, magnésio e potássio trocáveis; capacidade de troca catiônica e saturação por bases, além da massa seca da parte aérea (MSPA) e raízes (MSRA), massa seca dos grãos (MSGR) e teores de macro e micronutrientes do feijoeiro. Os biochars corrigiram a acidez do solo, aumentaram a capacidade de troca catiônica, carbono e nutrientes do solo, especialmente, nas doses mais altas de biochar de esterco bovino. A sílica solúvel presente no biochar provavelmente contribuiu para aumentar a disponibilidade de fósforo no solo e não interferiu no método de determinação do fósforo disponível. A produção do feijoeiro aumentou no solo corrigido com biochars, mas foi inferior à obtida no tratamento convencional, em que foram adicionados corretivos de acidez do solo e fertilizantes minerais.

Palavras-chave: Calagem. *Phaseolus vulgaris* L. Pirólise. Fósforo.

BIOCHAR FROM RICE HUSK AND FROM CATTLE MANURE AS SOIL CONDITIONERS FOR THE COMMON BEAN PLANT PRODUCTION

The use of organic waste from agriculture and livestock in the form of biochar can be a viable alternative both in the process of managing the biomass generated in the recycling of nutrients contained in solid waste. Thus, the present work should aim to evaluate the potential of biochars produced from bovine manure and rice husk in the chemical properties of the soil and in for the common bean plant production. For this, two experiments were set up: both in a greenhouse in a completely randomized design, the first in a 4x2+3 factorial scheme, with four doses of biochar (1, 2, 3 and 4% (m/v)= conditioner mass/soil volume), two types biochar = biochar from dairy cattle manure (BEB) and rice husk biochar (BCA) and three additional treatments (control 1, without liming and without fertilization; control 2, addition of calcium carbonate, magnesium carbonate (P.A) and nitrogenous, phosphate and potassium mineral fertilizers and; control 3, addition of calcium and magnesium silicate and nitrogenous and potassium mineral fertilizers). The second, in a 2x2x2+1 factorial scheme, with eight replications, with two types of biochar = biochar from dairy cattle manure (BEB) and rice husk biochar (BCA) at a 4% dose (m/v) = (conditioner mass/soil volume), with and without acidity correctors (addition calcium carbonate and magnesium carbonate (P.A)), without and whit phosphorus and a control treatment (without the addition of biochar, acidity corrective and phosphorus). In the first experiment, on the soil samples from each pot, collected after 20 days of incubation with treatments (first stage), the following analyzes were performed: total carbon, pH in water; phosphorus extracted by Mehlich 1 solution and quantified by colorimetry with ammonium molybdate; phosphorus extracted by Mehlich 1 solution and by ion exchange resin and quantified by spectrometry with inductively coupled plasma (ICP-MS/MS); exchangeable aluminum, calcium and magnesium; cation exchange capacity; base saturation; soluble silicon and dry mass of shoots and roots of common bean plant. In the second experiment, in the soil of each pot, collected after 30 days of incubation with treatments, the total carbon (CT) was determined; total nitrogen; pH in water; phosphorus extracted by Mehlich 1; aluminum (exchangeable acidity); exchangeable calcium, magnesium and potassium; cation exchange capacity and base saturation in addition to the dry mass of shoots (MSPA), and roots (MSRA), dry mass of grains (MSGR) and macro and micronutrient contents of common bean plant. The biochars corrected the acidity of the soil, increased the capacity for cation exchange, carbon and soil nutrients, especially at the higher doses of biochar from cattle manure. The soluble silica present in the biochar contributed to increase the availability of phosphorus in the soil and did not interfere in the method of determining the available phosphorus. The common bean plant production increased in the soil corrected with biochars, but it was lower than that obtained in the conventional treatment, where soil acidity correctives and mineral fertilizers were added.

Key-words: Liming. *Phaseolus vulgaris* L. Pyrolysis. Phosphorus.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- 4.1 Artigo 1 – Disponibilidade de fósforo em solos adubados com biochar de casca de arroz e de esterco bovino e cultivado com feijoeiro30**
- Figura 1 – Esquema representativo A) esferas confeccionadas a partir de esterco bovino para a produção de biochar; B) e C) biochar de esterco bovino e biochar de casca de arroz , respectivamente, antes da trituração mecânica; D) feijoeiro comum aos nove dias após a semeadura36
- Figura 2 – Valores relativos, calculados a partir do tratamento de referência, Controle 2 (100%), para as variáveis A) carbono total (CT), pH, P (P-RE), Si; B) K, Ca, Mg, CTC; C) matéria seca da parte aérea (MSPA) e raiz (MSRA) e relação (MSPA/MSRA) do feijoeiro45
- 4.2 Artigo 2 – Biochar como corretivo da acidez do solo e fonte de fósforo para plantas de feijoeiro50**
- Figura 1 – Esquema representativo A) vaso contendo solo e tratamentos antes do período de incubação; B) experimento estabelecido aos 80 dias após a semeadura54

LISTA DE TABELAS

4.1 Artigo 1 – Disponibilidade de fósforo em solos adubados com biochar de casca de arroz e de esterco bovino e cultivado com feijoeiro	30
Tabela 1 – Esquema de tratamentos utilizados no experimento	33
Tabela 2 – Caracterização do biochar de casca de arroz (BCA) e do biochar de esterco bovino (BEB), quantidades de BCA e BEB, nutrientes e elementos-traço adicionados ao solo pelos respectivos biochars. Média (n=4)	35
Tabela 3 – Equações de regressão ajustadas para carbono total (CT), pH em água, alumínio trocável, fósforo disponível extraído pela solução de Mehlich 1 e determinado por colorimetria (P Mehl. C) e por espectrometria de plasma (P Mehl. E) e extraído por resina de troca iônica e determinado por espectrometria de plasma (P Res. E) e sílica solúvel (Si) no solo após aplicação de biochar.....	39
Tabela 4 – Equações de regressão ajustadas para potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V) no solo após a aplicação de biochar.....	44
Tabela 5 – Equações de regressão ajustadas para a matéria seca da parte aérea (MSPA) e raiz (MSRA) após a aplicação de biochar e relação entre matéria seca da parte aérea e raiz (MSPA/MSRA)	47
4.2 Artigo 2 – Biochar como corretivo da acidez do solo e fonte de fósforo para plantas de feijoeiro	50
Tabela 1 – Caracterização dos biochars de casca de arroz (BCA) e de esterco bovino (BEB) e as quantidades de nutrientes e elementos-traço adicionados ao solo (4%) pelos respectivos biochars. Média (n=4).....	55
Tabela 2 – Valores de carbono total (CT), nitrogênio total (NT), pH e alumínio (Al) do solo com e sem fósforo (P), com (CC) e sem calagem (SC), após aplicação de BCA (biochar de casca de arroz) e BEB (biochar de esterco bovino).....	57
Tabela 3 – Valores de carbono total (CT), nitrogênio total (NT), pH e alumínio (Al) do solo com (CC) e sem calagem (SC), após aplicação de BCA (biochar de casca de arroz) e BEB (biochar de esterco bovino).....	57
Tabela 4 – Valores de fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V) do solo com (CC) e sem calagem (SC), com e sem P após aplicação de BCA (biochar de casca de arroz) e BEB (biochar de esterco bovino)	58
Tabela 5 – Valores de fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V) do solo com (CC) e sem calagem (SC), após aplicação de BCA (biochar de casca de arroz) e BEB (biochar de esterco bovino).....	60
Tabela 6 – Matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca das raízes (MSRA), matéria seca de grãos (MSGR), matéria seca de cem grãos (MSCG), com e sem fósforo (P), com (CC) e sem calagem (SC), após aplicação de BCA (biochar de casca de arroz) e BEB (biochar de esterco bovino)	61
Tabela 7 – Matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca das raízes (MSRA), matéria seca de grãos (MSGR), matéria seca de cem grãos (MSCG), com (CC) e sem calagem (SC), após aplicação de BCA (biochar de casca de arroz) e BEB (biochar de esterco bovino).....	61

Tabela 8 – Teores foliares de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S), em feijoeiro com e sem fósforo (P), com (CC) e sem calagem (SC), após a aplicação de BCA (biochar de casca de arroz) e BEB (biochar de esterco bovino)	62
Tabela 9 – Teores foliares de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S), em feijoeiro com (CC) e sem calagem (SC), após a aplicação de BCA (biochar de casca de arroz) e BEB (biochar de esterco bovino).....	63
Tabela 10 – Teores foliares de micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn), em feijoeiro com e sem fósforo (P), com (CC) e sem calagem (SC), após a aplicação de BCA (biochar de casca de arroz) e BEB (biochar de esterco bovino)	63
Tabela 11 – Teores foliares de micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn), em feijoeiro com (CC) e sem calagem (SC), após a aplicação de BCA (biochar de casca de arroz) e BEB (biochar de esterco bovino).....	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo geral	14
2.2	Objetivos específicos.....	14
3	REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1	O feijoeiro comum (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	15
3.2	Pirólise e biochar	15
3.3	Biochar como fonte de fósforo	16
3.4	Casca de arroz	18
3.5	Esterco bovino.....	19
3.6	Biochar como condicionador do solo.....	20
3.7	Referências	22
4	ARTIGOS	30
4.1	Artigo 1 – Disponibilidade de fósforo em solos adubados com biochar de casca de arroz e de esterco bovino e cultivado com feijoeiro.....	30
4.2	Artigo 2 – Biochar como corretivo da acidez do solo e fonte de fósforo para plantas de feijoeiro	50
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68

1 INTRODUÇÃO

O rápido crescimento da população humana, em escala global, estimado em 10 bilhões de pessoas para 2050 (WALLERSTEIN, 2020), acarretará em uma grande demanda por recursos, como fertilizantes fosfatados para a produção de alimentos, além da geração de vultosos volumes de resíduos agrícolas. O fósforo é considerado um elemento essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas. É extraído das rochas fosfáticas, sendo, portanto uma fonte finita. Países do continente africano, como Marrocos e África do Sul, além dos asiáticos Jordânia e China, juntamente com os Estados Unidos da América, concentram 85% das reservas mundiais (JASINSKI, 2015). No entanto, em virtude da crescente demanda, estima-se que as reservas de fósforo do planeta se esgotem nos próximos 50 - 100 anos (MUKHERJEE; CHOWDHURY; RAY, 2015).

Além desse prognóstico preocupante, conflitos políticos entre países podem repercutir negativamente na oferta mundial de fertilizantes fosfatados (KUOK, 2013), o que coloca em risco o abastecimento de países, como o Brasil, cuja produção de alimentos é altamente dependente da importação desse mineral. O uso de tecnologias alternativas, como a pirólise, processo térmico pelo qual ocorre a decomposição da matéria orgânica, em um ambiente com pouco ou com ausência de oxigênio (WANG, *et. al*, 2017a), possibilita a transformação de resíduos agropecuários potencialmente capazes de se tornarem passivos ambientais, em um insumo benéfico como biocarvão ou biochar, que, além de incrementar o aporte de carbono do solo, pode promover a reciclagem de nutrientes, como o fósforo, melhorando a qualidade do solo de forma sustentável.

O biochar tem efeitos diretos na fertilidade do solo, alterando suas características físicas e químicas, além de contribuir para a mitigação dos efeitos de gases do efeito estufa, por reduzir as emissões de CO₂ por seu alto teor de carbono recalcitrante, o que lhe confere maior persistência no solo (CONTE, 2014).

O biochar exerce, também, efeito regulador na comunidade microbiana do solo, por meio, por exemplo, do aumento do número de bactérias e actinomicetos, a biomassa carbono e nitrogênio e a taxa de respiração do solo (DING; LIU; WANG, 2013; HANJUN; XIAONA; YIHE, 2017).

Apesar de vários trabalhos comprovarem os efeitos positivos do biochar, como condicionador de solo, seus efeitos precisam ser melhor compreendidos, principalmente na disponibilidade de fósforo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o efeito do biochar obtido, a partir do esterco bovino leiteiro e da casca de arroz, como condicionador de solo e na produção do feijoeiro.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o biochar como fonte de silício para o feijoeiro;
- Avaliar a capacidade do biochar em aumentar a disponibilidade de fósforo no solo;
- Avaliar o potencial do biochar de esterco bovino leiteiro e da casca de arroz nas propriedades químicas do solo;
- Avaliar o crescimento, o desenvolvimento e a nutrição de plantas de feijoeiro adubadas com biochar;
- Comparar o efeito neutralizante da acidez do solo exercido pela aplicação de biochar de esterco bovino leiteiro e de casca de arroz, carbonato de Ca e Mg e silicato de Ca e Mg.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 O feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.)

O feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma planta muito utilizada na alimentação humana, seus grãos e vagens são importantes fontes proteicas, bastante apreciados em vários países, sendo considerada uma das principais leguminosas de grãos do mundo (EUZÉ *et al.*, 2013). O feijão é um alimento considerado de fácil acesso, rico em aminoácidos, fibras, vitaminas e proteínas, sendo os países, como Mianmar, Índia e Brasil, nessa ordem, principais produtores mundiais (GANASCINI *et al.*, 2019).

Em 2019, a área total plantada no mundo foi de aproximadamente 38,2 milhões de hectares, com produção em torno de 57,4 milhões de toneladas (EKE *et al.*, 2020). A estimativa é de que, para a safra de 20/21, a produção brasileira dessa cultura seja de 3.250 mil toneladas cultivadas, em 2.945,9 mil hectares, com produtividade esperada de 1.103 kg ha⁻¹ (CONAB, 2021).

Por ser uma cultura de ciclo curto, o feijoeiro requer maior demanda de nutrientes para o seu crescimento e desenvolvimento (LACERDA, NASCENTE; PEREIRA, 2019). Além da fertilidade do solo, a produção do feijoeiro comum é fortemente afetada por fatores como estresse hídrico (BATIONO *et al.*, 2004).

Em solos tropicais, o fósforo geralmente ocorre em baixa disponibilidade, em função das reações de fixação entre os ânions fosfatos e os minerais da fração argila, comprometendo a sua absorção pelas plantas (YUAN; XU, 2012; ABDALA *et al.*, 2015). Para o feijoeiro, o fósforo exerce papel fundamental na produtividade de grãos, estabelecimento das raízes e no incremento do número de vagens (ARF *et al.*, 2011). A demanda por fósforo, nitrogênio e potássio pelo feijoeiro é de 16, 112 e 138 kg ha⁻¹, respectivamente (PEGORARO *et al.*, 2014).

3.2 Pirólise e biochar

O biochar é um material rico em carbono, aromático e recalcitrante obtido a partir da pirólise de vários tipos de biomassa (WANG *et al.*, 2020). A pirólise (do grego *pyros* – fogo – e *lysis* – quebra, dissolução) é um processo termoquímico realizado em um ambiente limitado por oxigênio, capaz de transformar a biomassa em energia e em produtos químicos nos estados líquido (bio-óleo), sólido (biochar) e gasoso (biogás) (JAHIRUL *et al.*, 2012). O rendimento desses produtos depende principalmente da temperatura, da taxa de aquecimento, do tempo de residência nos reatores e dos resíduos utilizados (SINGH *et al.*, 2020).

O biochar é um produto sólido, obtido pela chamada “pirólise lenta” sob baixas temperaturas (400-500°C) e taxas de aquecimento e longos tempos de residência (KHAN; MUKHLIF; KAN, 2017; MOHAN; PITTMAN JR; STEELE, 2006; DEMIRBAS, 2005).

O estudo do biochar, como condicionador do solo, teve como inspiração as “Terras Pretas de Índio” (TPI). As TPI são solos amazônicos desenvolvidos por povos pré-colombianos, sendo

caracterizados por sua elevada fertilidade e capacidade na retenção de carbono no solo (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

Diversas fontes de biomassa podem ser utilizadas na produção de biochar. Dessa forma, a pirólise de diferentes matérias-primas irá se processar por vias e mecanismos distintos (VASSILEV *et al.*, 2010). A Composição elementar da biomassa vegetal é representada na maior parte por celulose, hemicelulose e lignina (LI *et al.*, 2020). Em geral, a celulose é responsável pela maior fração dessa biomassa (35-50%), já a hemicelulose responde por (20-35%), enquanto a lignina por (10-25%), ocorrendo também uma fração ínfima de extrativos e cinzas (SANTOS *et al.*, 2012). Essa proporção é variável, conforme a espécie vegetal (PÉREZ *et al.*, 2002) e, durante a pirólise, parece influenciar na conversão da fração de carbono volátil em óleo e gás, e a de carbono estabilizado em biochar (SOHL, 2010). Além disso, o alto teor de lignina, presente na biomassa de origem vegetal, resulta em maior rendimento de biochar (PAN *et al.*, 2020).

Apesar da pluralidade na constituição química e estrutural dos biochars, em função das condições de pirólise e da matéria-prima utilizada, alguns atributos são compartilhados, tais como o elevado teor de carbono e a recalcitrância (TRAZZI *et al.*, 2018).

Durante a pirólise da biomassa, ocorrem as reações químicas primárias e secundárias, responsáveis pelos processos de degradação e de recombinação. Com as reações primárias, ocorrem a decomposição da matéria-prima pelo rompimento de macromoléculas, fragmentação e obtenção do biochar, maximizando os produtos sólidos e, com as secundárias, a decomposição e recombinação dos seus intermediários, como compostos voláteis e levoglucosan (principal produto da decomposição da celulose), cuja condensação corresponde à fração fluida da pirólise (COLLARD; BLIND, 2014; SHARMA; PARREK; ZHANG, 2015; LUENGO; FELFLI; BEZZON, 2008).

A decomposição térmica dos componentes da biomassa ocorre em distintas faixas de temperatura: a hemicelulose entre 200 e 260°C, a celulose entre 240 e 350°C e a lignina entre 280 e 500°C, aproximadamente (DOWNIE; CROSKY; MUNROE, 2009; RAAD, 2006). Esses componentes darão origem à formação de estruturas alifáticas (alquilas e di-O-alquilas), provenientes da celulose e de grupos aromáticos, como (C-arila) advindos das moléculas de lignina (PETTER *et al.*, 2016).

3.3 Biochar como fonte de fósforo

Diante da ameaça de esgotamento das reservas mundiais das fontes naturais de fósforo, estudos têm sido direcionados na busca de formas alternativas eficientes na reciclagem e melhor aproveitamento desse nutriente (KEILUWEIT *et al.*, 2010; LI *et al.*, 2019; VAN DER KOOIJ *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2020; MA *et al.*, 2020).

Nesse contexto, o biochar tem sido apontado como um material promissor capaz atuar como uma fonte direta de P solúvel no solo, com a liberação de P parcialmente estável, pela conversão termoquímica da biomassa (CHENG *et al.*, 2006; DE LA ROSA *et al.*, 2014).

Além disso, o biochar, após adicionado ao solo, pode alterar seu pH, reduzindo a afinidade do fosfato com os íons Fe^{+3} , Al^{+3} e Ca^{+2} , como também proporcionar ambiente propício para o desenvolvimento e atividade da microbiota pelo enriquecimento do aporte de C no solo, especialmente

por compostos alifáticos de biochar, incrementando o P disponível no solo (SARFRAZ *et al.*, 2019; WARNOCK *et al.*, 2007; XU *et al.*, 2019; ZHOU *et al.*, 2020; ZIMMERMAN; OUYANG, 2019).

Contudo a aplicação de biochar, em função das suas propriedades, influencia de forma distinta aspectos do solo, como alterações no pH, mineralização de P e organização da comunidade bacteriana (KOLTON *et al.*, 2011).

O aumento da temperatura pirolítica confere pH alcalino ao biochar pela dissipação de gases oriundos da degradação de componentes da matéria orgânica original (carboxilas, carbonilas e compostos fenólicos), concentrando grupos básicos de superfície (CHEN *et al.*, 2014), sobretudo, carbonatos inorgânicos e ânions orgânicos que contribuem para a alcalinidade de biochar (YUAN; XU; ZHANG, 2011).

A oxidação da superfície de biochar, ao expor grupos funcionais remanescentes, como os carboxílicos e fenólicos, leva à formação de cargas negativas, que, por sua vez, podem provocar a retenção de íons H^+ do solo, disponibilizando cargas que estavam ocupadas, reduzindo a acidez do solo, além de contribuir na formação de complexos catiônicos na superfície de biochar, aumentando a CTC do solo (NOVAK *et al.*, 2009b; SIZMUR *et al.*, 2015). Além disso, o aumento do pH do solo por biochar pode, em solos ácidos, reduzir a sorção de fósforo (QAYYUM *et al.*, 2015). A atividade da CTC do biochar é dependente, sobremaneira, da matéria-prima utilizada e da temperatura pirolítica (SINGH; SINGH; COWIE, 2010). Alguns biochars têm considerável CTA (capacidade de troca aniônica), evitando assim a lixiviação de nutrientes aniônicos como nitratos e fosfato (LAWRINENKO *et al.*, 2017).

Segundo Glaser; Lehr, (2019), a disponibilidade de P no solo, após aplicação de biochar, também, é afetada pelo tipo de matéria-prima, condições de pirólise e doses utilizadas, podendo os resultados serem percebidos em curto, médio e longo prazos.

Ainda a composição granulométrica de biochar sugere uma participação direta no aumento dos teores de fósforo no solo, já que partículas menores de biochar possuem maior grau de degradação no solo, além disso, suas cinzas, capazes de aumentar o pH, potencializam a disponibilidade de fósforo no solo (TAGHIZADEH-TOOSI *et al.*, 2012). Da mesma maneira, a variação das propriedades de biochar, em função das condições de produção, influenciará na capacidade de biochar no fornecimento de nutrientes, uma vez que pode ser fonte de nutrientes para as plantas pela disponibilização de compostos inorgânicos como N, K, Ca e P (TAN; LAGERKVIST, 2011).

Ademais, biochars produzidos, a partir de esterco animal apresentam maiores quantidades de nutrientes minerais quando comparados aos de biomassa vegetal, por possuírem maior quantidade de cinzas (NOVAK *et al.*, 2009a; GUNES *et al.*, 2014; HUANG *et al.*, 2017; TAN *et al.*, 2018). Esses resultados corroboram com os encontrados por Azargohar *et al.*, (2014) que, ao estudarem biochars produzidos a $475^{\circ}C$, verificaram concentrações menores na ordem de 10,5; 10,22; 2,9 para Ca; 7,96; 13,56; 3,29 para Mg; 2; 17,26; 5,06 para K e de 17,79; 44,97; 12,25 para P, respectivamente, em biochars de palha de trigo, serragem e palha de linho, quando comparados com biochar de esterco animal.

O incremento na disponibilidade P inorgânico por biochar produzido a partir de esterco deve-se principalmente à presença de espécies como pirofosfatos e ortofosfatos, os quais juntos representam mais de 50% do P total liberado por biochar (QIAN *et al.*, 2013; JIN *et al.*, 2016).

A temperatura pirolítica é considerada outro fator importante na disponibilidade de P. No estudo realizado por Glaser; Lehr, (2019), concluiu-se que biochars produzidos, em baixas temperaturas (450°C) e em médias temperaturas de pirólise (450- 600°C), tiveram aumentos significativos na disponibilidade de P, ao contrário de biochars produzidos a temperatura elevadas (>600 °C). É possível que isso se deva ao fato de que o fósforo tende a volatilizar-se a temperaturas acima de 700°C (KNICKER, 2007; LUCA, 2009; TURNER *et al.*, 2007), assim, temperaturas de pirólise, consideradas baixas e médias, proporcionaram maior enriquecimento de P em biochar.

3.4 Casca de arroz

O arroz é um cereal bastante consumido em todo o mundo. Estima-se que sejam produzidos, anualmente no mundo, 499 milhões de toneladas de arroz (USDA, 2020). A casca de arroz é um resíduo agroindustrial gerado, durante o processo de beneficiamento do grão, representando 20 a 30% do seu peso (LIM *et al.*, 2012). Estima-se que, em todos os anos, mais de 80 milhões de casca de arroz sejam produzidos no mundo e 97% desse total em propriedades de países em desenvolvimento (ZHANG *et al.*, 2015).

No Brasil, de acordo com os dados da CONAB (2019), a produção do cereal, para a safra 2018/2019, foi de 11, 207 milhões de toneladas, o que significa afirmar que foram gerados entre 2,2 a 3,4 milhões de toneladas do resíduo apenas naquele ano.

Entretanto a falta de adequado gerenciamento desse resíduo, em algumas propriedades, faz com que ocorra a sua queima a céu aberto, como única forma de tratamento, o que pode gerar considerável poluição ambiental (ARAI *et al.*, 2015; ZHANG; XIONG, 2016). Conforme Bediako *et al.* (2020), tanto a queima desordenada quanto a falta de gestão da casca de arroz afetam a qualidade do ar, comprometendo negativamente o meio ambiente e a saúde pública.

A casca de arroz é composta basicamente por celulose (28,6 - 43,3%), hemicelulose (22 - 29,7%), lignina (19,2 - 24,4%), além de uma quantidade significativa de sílica e outros elementos componentes da fração inorgânica (GOODMAN, 2020).

Alguns estudos têm abordado os efeitos do biochar de casca de arroz no solo. Feng *et al.*, (2020) observaram significativo efeito biorremediador do uso de biochar de casca de arroz inoculado com *Bacillus siamensis* na adsorção de dibutilftalato na descontaminação de solos agrícolas.

Singh *et al.* (2018) observaram que o uso de biochar de casca de arroz, em um solo agrícola tropical no cultivo de arroz de sequeiro, proporcionou maior disponibilidade de nutrientes às plantas, melhor condição de desenvolvimento da microbiota do solo e produtividade das plantas. Resultados similares foram alcançados por Munda *et al.*, (2018), no cultivo da mesma planta com a utilização de biochar de casca de arroz. Os mesmos autores verificaram maior enriquecimento de C no solo na forma de C orgânico total (43 - 169%) e maior produtividade agrícola no rendimento de grãos de até 24%.

O'connor *et al.* (2018), em um ensaio ao Sul da China, observaram aumento da capacidade adsorptiva de Hg⁺² em 73% com o uso de biochar de casca de arroz como sorvente modificado com S em solos contaminados com Hg e diminuição de até 99% na lixiviação desse elemento nos solos

tratados. Também Lu, Sun e Zong (2014) verificaram alterações na qualidade física do solo, como aumento da estabilidade de agregados, maior porosidade e maior capacidade de retenção hídrica, após correção com biochar de casca de arroz.

Ahmadi, Ghasemi e Sepasklah (2020) avaliaram a influência do biochar de casca de arroz em condições simuladas de escoamento e perda de solo com aplicação sucessiva de chuva simulada. Eles constataram que a aplicação de 2 kg m⁻² de biochar reduziu o escoamento e as taxas de perda de solo em 16% e 45%, respectivamente, em comparação com a aplicação sem biochar.

Tais ensaios evidenciam a potencialidade do biochar de casca de arroz, como condicionador do solo, uma vez que possibilita a melhoria das características químicas, físicas e biológicas do solo.

3.5 Esterco bovino

O Brasil ocupa a primeira posição no *ranking* de exportação de carne bovina, possuindo um rebanho próximo de 221,8 milhões de cabeças, além de uma produção anual de 34 bilhões de litros de leite, em 2017, sendo também um dos maiores produtores de leite no cenário internacional (FERREIRA; MIZIARA; COUTO 2020).

Apesar da sua importância na segurança alimentar mundial, a bovinocultura traz como ônus a geração de grande volume de excrementos, os quais, na maioria das propriedades, são dispostos na forma de pilhas ao ar livre, gerando sérios danos ambientais. Segundo Yilmaz *et al.* (2019), um bovino gera aproximadamente 28 kg de dejetos/dia. Considerando um rebanho de 221,8 milhões de cabeças, é possível concluir que são despejadas, diariamente, mais de 6 bilhões de toneladas de dejetos em solo brasileiro.

Entre os impactos ambientais gerados pelo esterco bovino, quando dispostos de forma inadequada, tem-se a poluição do ar, contaminação dos cursos d'água, proliferação de moscas e micro-organismos, odor desagradável e emissão de gases de efeito estufa (GAVILI *et al.*, 2018; YILMAZ *et al.*, 2019).

Tradicionalmente o esterco bovino é utilizado como fonte de matéria orgânica, em várias propriedades, pelo fácil acesso, baixo custo e como fonte de nutrientes para as plantas, especialmente de nitrogênio. O grande entrave é que a taxa de mineralização do N orgânico dos resíduos é variável e depende principalmente de fatores como composição do material de origem e de sua relação C/N (COTTA *et al.*, 2015). Além disso, o uso imediato do esterco bovino, na forma de adubo no solo, pode gerar alguns inconvenientes, como a presença de contaminantes como o nitrato tóxico (CAO *et al.*, 2016).

Outros estudos reportam a busca por alternativas à utilização e destinação final do esterco bovino, seja como matéria-prima na obtenção de carvão ativado na remoção de contaminantes orgânicos Quian *et al.*, (2009); na forma de substrato Ramya; Shree, (2014), na reciclagem de nutrientes pela compostagem (ECKHARDT *et al.*, 2016; COSTA *et al.*, 2015; KATOH *et al.*, 2015; PISA; WUTA; MUCHAONYERWA, 2020) e na avaliação do comportamento térmico na combustão conjunta com outros materiais por incineração (ZHANG *et al.*, 2020).

Apesar dos efeitos positivos alcançados, em muitos desses trabalhos, boa parte deles envolve processos e métodos que provocam a degradação imediata do esterco, promovendo perdas de carbono para o ambiente na forma de CO₂, além da liberação de gases poluentes para a atmosfera em diferentes graus de emissão. Dessa forma, outras pesquisas e estudos são necessários no aproveitamento e destinação do esterco bovino, como seu uso na forma de biochar, especialmente por seu potencial na reciclagem de nutrientes e por sua capacidade de apresentar o carbono, em sua forma recalcitrante e, portanto de maior estabilidade.

3.6 Biochar como condicionador do solo

A qualidade do solo reflete a sua aptidão em promover um meio favorável à manutenção da vida animal e vegetal, sendo, portanto de fundamental importância para as fases de nutrição, produção e desenvolvimento dos ecossistemas terrestres (DORAN *et al.*, 1997).

O fato da qualidade do solo não ser diretamente estimada faz com que se usem indicadores para essa análise, dentre os quais se destaca o teor de carbono no solo (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009). Em termos agronômicos, indicadores da qualidade do solo satisfatórios deverão compreender os aspectos biológicos, físicos e químicos do solo, de modo que a interface solo-planta seja favorecida (DIONÍSIO *et al.*, 2016).

Um material alternativo que pode ser utilizado no incremento da qualidade do solo é o biochar, que é um produto sólido, rico em carbono, capaz de enriquecer a sua fertilidade, aumentar a retenção hídrica, desativar moléculas de defensivos agrícolas e minimizar a emissão de gases do efeito estufa (REN *et al.*, 2016).

O efeito condicionante de biochar tem motivado o estudo de diferentes biochars com características distintas (LEHMANN *et al.*, 2011). Entre as melhorias pelo uso de biochar, podem ser citadas o incremento da fertilidade do solo, favorecimento no estabelecimento vegetal, aumento da capacidade de troca catiônica, retenção hídrica, teor de nutrientes e do pH do solo (CANTONI *et al.*, 2019). O efeito de biochar, como condicionador do solo, depende de suas características físico-químicas, as quais repercutem em sua reatividade, aromaticidade e superfície específica (CUNHA *et al.*, 2009).

O biochar apresenta sua reatividade influenciada pelas reações de oxidação incompleta e pela ação microbiológica em sua superfície, gerando assim grupos funcionais (ALHO *et al.*, 2008), como, por exemplo os grupos carboxílicos, que tendem a ser mais reativos que os grupos aromáticos, pela presença do grupo funcional COOH (CANELLAS *et al.*, 2008). Por essa razão, a dissociação do grupo orgânico COOH em biochar pode diminuir a hidrofobicidade de ácidos aromáticos por formação de espécies aniônicas (KAH *et al.*, 2017). Vários trabalhos atestam o efeito positivo do uso de biochar como condicionador do solo.

Estudo realizado por Lévesque *et al.* (2020) demonstrou que a adição de 5, 10 ou 15% (v/v) de biochar em substituição à perlita em meio de crescimento à base de turfa no cultivo de pimentão e tomate, em ambiente protegido em comparação ao tratamento controle (sem biochar), melhorou a eficiência no uso da água pelas plantas, aumentou o rendimento do peso seco do tomate e do

pimentão em até 32% e 54%, respectivamente, melhorou a eficiência na absorção de N, P, diminuindo as perdas de NO_3^- e PO_4^{3-} nos lixiviados, além de ter aumentando a população microbiana, notadamente, *Agrobacterium*, *Cellvibrio* e *Streptomyces*, atribuindo tal fato à melhoria de alguns micro-nichos ecológicos, como acessibilidade de C.

A redução da acidez trocável e o aumento do pH, em solo ácido de baixa fertilidade, foram relatados com a adição de biochar (10 g kg^{-1}). Além disso, a aplicação de biochar propiciou aumentos dos níveis de bases trocáveis (Ca^{+2} , Mg^{+2} e K^+) e disponibilidade de P, como também melhorou a eficiência na absorção de nutrientes de plantas de soja cultivadas em vasos (MASUD; LI; XU, 2014).

Rees; Simonnot e Morel (2014) ao avaliarem a cinética de sorção-dessorção, em um solo ácido e outro básico, contaminados por Zn, Cd e Pb, após correção com biochar, verificaram que a granulometria do biochar influenciou na sorção dos metais, indicando uma limitação pela difusão intrapartícula, ocorrendo, ainda, uma imobilização desses metais por processos de alcalinização do solo.

Também, Ippolito *et al.* (2017); Inyang *et al.* (2016); Wang *et al.* (2017b) verificaram efeito alcalinizante do biochar, o que levou à descontaminação do solo por metais pesados.

O biochar pode também alterar a densidade aparente, porosidade, retenção hídrica e condutividade hidráulica do solo, graças à sua extensa área de superfície específica e estrutura porosa (CASTELLINI, *et al.*, 2015). Essa constatação corrobora com os resultados encontrados por Xiaoquin *et al.* (2020), que relataram, ao estudarem os efeitos da correção do biochar (0; 2 e 5%, p / p) nas propriedades físicas de um solo salino costeiro, melhorias nas estruturas dos poros e nas suas características hídricas, atribuindo esse efeito a uma forte variação espacial, estrutural e no formato dos poros do solo, especialmente de microporos por biochar, aumentando a sua capacidade de armazenamento de água.

Outros estudos mostraram que a adição de biochar alterou a conformação radicular e a capacidade de absorção das plantas. Olmo *et al.* (2016) afirmam que a adição de biochar influenciou a disponibilidade de N, Mn e P do solo, e que a interação biochar-raiz de plantas de trigo propiciou maior crescimento das raízes, especialmente raízes finas, melhorando a capacidade de exploração do solo pelo sistema radicular.

Alterações na raiz do milho também foram relatados por Brennan *et al.* (2014), que observaram maior comprimento e densidade de raízes, quando comparadas ao tratamento controle, além de diferentes níveis de absorção de Cu e As em solo contaminado, em função do tipo de biochar utilizado.

De acordo com Hashem, *et al.* (2019), a inoculação de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) associada à aplicação de biochar, desempenhou papel fundamental no desempenho de grão-de-bico sob estresse hídrico, melhorando o crescimento das raízes, parte aérea foliar e número de ramos, sendo que a correção do biochar melhorou de forma significativa os efeitos negativos da seca, com maior população de esporos, número de micélio, arbúsculos e porcentagem de colonização, o que aumentou a síntese de clorofila, a eficiência fotossintética líquida e a absorção de nitrogênio e fósforo.

De forma semelhante, Graber *et al.* (2010), ao avaliarem o impacto das adições de (1-5% p/p) de biochar, no desenvolvimento e produtividade de plantas de *Capsicum annuum* e *Lycopersicon esculentum*, observaram, além de aumentos no crescimento e produtividade das plantas, mudanças na população de rizobactérias e fungos benéficos.

Diante do exposto, pode-se inferir que a combinação dos efeitos positivos na melhoria da qualidade do solo conferidos por biochar proporciona um ambiente favorável, potencialmente adequado ao crescimento das raízes, melhorando a fertilidade do solo e com capacidade de impactar diretamente no crescimento e desenvolvimento de plantas de interesse agrônômico.

3.7 Referências

- AHMADI, S. H.; GHASEMI, H.; SEPASKLAH, A. R. Rice husk biochar influences runoff features, soil loss, and hydrological behavior of a loamy soil in a series of successive simulated rainfall events. **Catena**, v.192, p.104587, 2020.
- ALHO, C. F.; NOVOTNY, E. H.; MAIA, C. M. B. F.; LIMA, E. A.; HANSEL, F. A. Chemical oxidation of *Eucalyptus benthamii* charcoal. *In*: CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE, [2008], Newcastle, UK. **Biochar, sustainability and security in a changing climate**, 2008.
- ARAI, H.; HOSEN, Y.; PHAM HONG, V. N.; THI, N. T.; HUU, C. N.; INUBUSHI, K. Greenhouse gas emissions from rice straw burning and straw-mushroom cultivation in a triple rice cropping system in the Mekong Delta. **Soil science and plant nutrition**, v. 61, n. 4, p. 719-735, 2015.
- ARF, M. V.; BUZETTI, S.; ARF, O.; KAPPES, C.; FERREIRA, J. P.; GITTI, D. C.; YAMAMOTO, C. J. T. Fontes e épocas de aplicação de nitrogênio em feijoeiro de inverno sob sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 3, p. 430-438, 2011.
- AZARGOHAR, R.; NANDA, S.; KOZINSKI, J. A.; DALAI, A. K.; SUTARTO, R. Effects of temperature on the physicochemical characteristics of fast pyrolysis bio-chars derived from Canadian waste biomass. **Fuel**, v. 125, p. 90-100, 2014.
- BATIONO, A. **Managing Nutrient Cycles to Sustain Soil Fertility in Sub-Saharan Africa**. Kenya: International Center for Tropical Agriculture (CIAT); Academy Science Publishers, 2004. 608p.
- BEDIAKO, M.; ADJAOTTOR, A. A.; GAWU, S. K.; AMANKWAH, E. O. Compressive strength and durability properties of pozzolan obtained from co-fired clay and rice husk. **Cogent Engineering**, v. 7, n.1, p.1811453, 2020.
- BRENNAN, A.; JIMÉNEZ, E. M.; PUSCHENREITER, M.; ALBURQUERQUE, J. A.; SWITZER, C. Effects of biochar amendment on root traits and contaminant availability of maize plants in a copper and arsenic impacted soil. **Plant and soil**, v. 379, n. 1-2, p. 351-360, 2014.
- CANELLAS, L. P.; TEIXEIRA JUNIOR, L. R. L.; DOBBSS, L. B.; SILVA, C. A.; MEDICI, L. O.; ZANDONARDI, D. B.; FAÇANHA, A. R. Humic acids crossinteractions with root and organic acids. **Annals of Applied Biology**, v.153, p.157-166, 2008.
- CANTONI, F.; SILVA, A. D. da; LOPES, M. A.; LAVNITCKI, L. Fitorremediação e biochar: uma alternativa para recuperação de áreas pós- mineração. **Habitats Urbanos e Rurais**, p. 237, 2019.
- CAO, H.; XIN, Y.; YUAN, Q. Prediction of biochar yield from cattle manure pyrolysis via least squares support vector machine intelligent approach. **Bioresource technology**, v. 202, p.158-164, 2016.
- CASTELLINI, M.; GIGLIO, L.; NIEDDA, M.; PALUMBO, A.D.; VENTRELLA, D. Impact of biochar addition on the physical and hydraulic properties of a clay soil. **Soil and Tillage Research**, v. 154, p. 1-13, 2015.
- CHEN, Z.; XIAO, X.; CHEN, B.; ZHU, L. Quantification of chemical states, dissociation constants and contents of oxygen-containing groups on the surface of biochars produced at different temperatures. **Environmental science & technology**, v. 49, n. 1, p. 309-317, 2015.

- CHENG, C. H.; LEHMANN, J.; THIES, J. E.; BURTON, S. D.; ENGELHARD, M. H. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. **Organic geochemistry**, v. 37, n. 11, p. 1477-1488, 2006.
- COLLARD, F. X.; BLIN, J. A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicellulose and lignin. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 594-608, 2014.
- CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**. Safra 2020/2021 - Quinto levantamento, Brasília, v. 8, n. 5, p. 1-94. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 15 fev. 2021.
- CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 11 jan. 2019.
- CONTE, P. Biochar, soil fertility, and environment. **Biology and Fertility**, v. 50, n. 8, p. 1175, 2014.
- COSTA, M. S. S. M.; CESTONARO, T.; COSTA, L. A. M.; ROZATTI, M. A. T.; CARNEIRO, L. J.; PEREIRA, D. C.; FRANCISCONI, H. E. Improving the nutrient content of sheep bedding compost by adding cattle manure. **Journal of Cleaner Production**, v. 86, p. 9-14, 2015.
- COTTA, J. A. D. O.; CARVALHO, N. C. L.; BRUM, T. D. S.; REZENDE, M. O. D. O. Compostagem versus vermicompostagem: comparação das técnicas utilizando resíduos vegetais, esterco bovino e serragem. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 65-78, 2015.
- CUNHA, T. J. F.; MARADI, B. E.; CANELLAS, L. P.; RIBEIRO, L. P.; BENITES, V. M.; SANTOS, G. A. Soil organic matter and fertility of anthropogenic dark earths (Terra Preta de Índio) in the Brazilian amazon basin. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 85-93, 2009.
- DE LA ROSA, J. M.; PANEQUE, M.; MILLER, A. Z.; KNICKER, H. Relating physical and chemical properties of four different biochars and their application rate to biomass production of *Lolium perenne* on a Calcic Cabisol during a pot experiment of 79 days. **Science of The Total Environment**, v. 499, p.175-184, 2014.
- DEMIRBAS, A. Pyrolysis of ground beech wood in irregular heating rate conditions. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 73, n. 1, p. 39-43, 2005.
- DING, Y. L.; LIU, J.; WANG, Y. Y. Effects of biochar on microbial ecology in agriculture soil: a review. **Ying yong sheng tai xuebao**, v. 24, n. 11, p. 3311-3317, 2013.
- DIONÍSIO, J. A.; PIMENTEL, I. C.; SIGNOR, D.; PAULA, A. M.; MACEDA, A.; MATTANA, A.L. **Guia Prático de Biologia do Solo**, Paraná: Sociedade brasileira de ciências do solo, 2016.
- DORAN, J. W.; SAFLEY, M.; PANKHURST, C.; DOUBE, B. M.; GUPTA, V. V. S. R. Defining and assessing soil health and sustainable productivity. **Biological indicators of soil health**, p.1-28, 1997.
- DOWNIE, A.; CROSKY, A.; MUNROE, P. Physical properties of biochar. Biochar for environmental management: Science and technology, v. 1, 2009. In: JOSEPH, S.; LEHMANN, J. **Biochar for environmental management: science and technology**. London, GB: Earthscan, 2009. p. 13-32.
- ECKHARDT, D. P.; REDIN, M.; JACQUES, R. J. S.; LORENSINI, F.; SANTOS, M. L. D.; WEILER, D. A.; ANTONIOLLI, Z. I. Mineralization and efficiency index of nitrogen in cattle manure fertilizers on the soil. **Ciência Rural**, v. 46, n. 3, p. 472-477, 2016.
- EKE, P.; WAKAM, L. N.; FOKOM, R.; EKOUNDA, T. V.; BOAT, M. A. B.; KEUMOE, R.; BOYOM, F. F. Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) root rot in humid lowland: Occurrence, and assessment of biotic and agronomic factors for mitigation prospects. **Rhizosphere**, v. 16, p. 100256, 2020.
- FENG, F.; CHEN, X.; WANG, Q.; XU, W.; LONG, L.; EL-MASRY, G.N.; WAN, Q.; YAN, H.; CHENG, J.; YU, X. Use of *Bacillus – siamensis*: inoculated biochar to decrease uptake of dibutyl phthalate in leafy vegetables. **Journal of Environmental Management**, v. 253, p. 109636, 2020.

FERREIRA, G. C. V.; MIZIARA, F. C.; MOREIRA, V. R. Pecuária em Goiás: Análise da distribuição espacial e produtiva. **REDE- Revista Eletrônica do PRODEMA**, Fortaleza, v.13, n. 2, p.21-39, 2020.

GANASCINI, D.; LAURETH, J. C. U.; MENDES, I. S.; TOKURA, L. K.; SUTIL, E. L.; VILLA, B.; ALOVISI, A. M. T; CAON, I. L.; MERCANTE, E.; COELHO, S. R. M. Analysis of the Production Chain of Bean Culture in Brazil. **Journal of Agricultural Science**, v.11, n.7, p.256-267, 2019.

GAVILI, E.; MOOSAVI, A. K.; MORADI CHOGHAMARANI, F. Cattle manure biochar potential for ameliorating soil physical characteristics and spinach response under drought. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 64, n. 12, p.1714-1727, 2018.

GLASER, B.; LEHR, V. I. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis. **Scientific reports**, v. 9, p. 9338, 2019.

GOODMAN, B. A. Utilization of waste straw and husks from rice production: A review. **Journal of Bioresources and Bioproducts**, v. 5, n. 3, p. 143-162, 2020.

GRABER, E. R.; HAREL, Y. M.; KOLTON, M.; CYTRYN, E.; SILBER, A.; DAVID, D. R.; ELAD, Y. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media. **Plant and soil**, v. 337, n.1-2, p. 481-496, 2010.

GUNES, A.; INAL, A.; TASKIN, M. B; SAHIN, O.; KAYA, E. C; ATAKOL, A. D. R. A. Effect of phosphorus-enriched biochar and poultry manure on growth and mineral composition of lettuce (*Lactuca sativa* L. cv.) grown in alkaline soil. **Soil use and management**, v. 30, n. 2, p. 182-188, 2014.

HANJUN, Z.; XIAONA, Y.; YIHE, Q.; Effects of biochar application on biological characteristics and respiration rate of Cd contaminated soil. **ZhongguoYancaoXuebao**, v.23, n. 6, p. 61-68, 2017.

HASHEM, A.; KUMAR, A.; AL-DBASS, A. M; ALQARAWI, A. A; AL-ARJANI, A. B. F; SINGH, G.; FAROOQ, M.; ABD-ALLAH, E. F. Arbuscular mycorrhizal fungi and biochar improves drought tolerance in chickpea. **Saudi journal of biological sciences**, v. 26, n. 3, p. 614-624, 2019.

HEUZÉ, V.; TRAN, G.; NOZIÉRE, P.; LEBAS, F. Common bean (*Phaseolus vulgaris*). In: **Feedipedia: a programme** by INRAE, CIRAD, AFZ and FAO. 2015. Disponível em: <https://www.feedipedia.org/node/266>. Acesso em: 2 fev. 2021.

HUANG, R.; FANG, C.; LU, X; JIANG, R.; TANG, Y. Transformation of phosphorus during (hydro) thermal treatments of solid biowastes: reaction mechanisms and implications for P reclamation and recycling. **Environmental science & technology**, v. 51, n. 18, p.10284-10298, 2017.

INYANG, M. I.; GAO, B.; YAO, Y.; XUE, Y.; ZIMMERMAN, A.; MOSA, A.; PULLAMMANAPPALLIL, P.; OK, Y. S.; CAO, X. A review of biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 46, n. 4, p. 406-433, 2016.

JAHIRUL, M. I.; RASUL, M. G.; CHOWDHURY, A. A.; ASHWATH, N. Biofuels production through biomass pyrolysis: a technological review. **Energies**, v. 5, n. 12, p. 4952-5001, 2012.

IPPOLITO, J. A.; BERRY, C. M.; STRAWN, D. G.; NOVAK, J. M.; LEVINE, J.; HARLEY, A. Biochars reduce mine land soil bioavailable metals. **Journal of environmental quality**, v. 46, n. 2, p. 411-419, 2017.

JAMES, E.; JOYCE, M. Assessment and management of microbial contaminants in watersheds. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 34, n. 2, p.109-139, 2004.

JASINSKI, S. M. Phosphate rock. In: Mineral Commodity Summaries. **Geological Survey**, Reston, Virgínia, p.118-119, 2015.

JIN, Y.; LIANG, X.; HE, M.; LIU, Y.; TIAN, G.; SHI, J. Manure biochar influence upon soil properties, phosphorus distribution and phosphatase activities: a microcosm incubation study. **Chemosphere**, v. 142, p. 128-135, 2016.

KAH, M.; SIGMUND, G.; XIAO, F.; HOLFMANN, T. Sorption of ionizable and ionic organic compounds to biochar, activated carbon and other carbonaceous materials. **Water Research**, v.124, p.673-692,2017.

KATOH, M.; WANG, Y.; KITAHARA, W.; SATO, T. Impact of phosphorus and water-soluble organic carbon in cattle and swine manure composts on lead immobilization in soil. **Environmental technology**, v. 36, n. 15, p. 1943-1953, 2015.

KEILUWEIT. M.; NICO, P. S.; JOHNSON, M. G.; KLEBER, M. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). **Environmental science & technology**, v. 44, n. 4, p. 1247-1253, 2010.

KHAN, T. A.; MUKHLIF, A. A; KAN, E. A. Uptake of Cu^{+2} and Zn^{+2} from simulated wastewater using muskmelon peel biochar: Isotherm and kinetic studies. **Egyptian journal of basic and applied sciences**, v. 4, n. 3, p. 236-248, 2017.

KNICKER, H. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. **Biogeochem**, v. 85, n. 1, p. 91-118, 2007.

KOLTON, M.; HAREL, Y. M; PASTERNAK, Z.;GRABER, E. R; ELAD, Y.; CYTRYN, E. Impact of biochar application to soil on the root-associated bacterial community structure of fully developed greenhouse pepper plants. **Applied and environmental microbiology**, v. 77, n. 14, p. 4924-4930, 2011.

KUOK. R. Salvage Job: With fertilizer prices skyrocketing, scientists scramble to recover phosphorus from waste. **Science News**, v. 183, n. 4, p. 20-24,2013.

LACERDA, M. C.; NASCENTE, A. S.; PEREIRA, E. T. L. Adubação nitrogenada afeta a produtividade e a qualidade comercial de grãos do feijoeiro em sistema de plantio direto. **Revista de Ciências Agrárias, Lisboa**, v. 42, n. 2, p.71-80, 2019.

LAWRINENKO, M.; JING, D.; BANIK, C.; LAIRD, D. A. Aluminum and iron biomass pretreatment impacts on biochar anion exchange capacity. **Carbon**, v. 118, p. 422-430, 2017.

LEG, E.; WANG, Y.; GONG, X.; ZHANG, B.; ZHANG, Y.; XU. M. Effect of KCl and CaCl_2 loading on the formation of reaction intermediates during cellulose fast pyrolysis. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 36, n. 2, p. 2263-2270, 2017.

LEHMANN, J.; RILING, M. C.; THIES, J.; MASIELLO, C. A.; HOCHADAY, W. C.; CROWLEY, D. Biochar effects on soil biota -a review. **Soil biology and biochemistry**, v. 43, n. 9, p. 1812-1836, 2011.

LÉVESQUE, V.; JEANNE, T.; DORAIS, M.; ZIADI, N.; HOGUE, R.; ANTOUN, H. Biochar improve tomato and sweet pepper performance and shift bacterial composition in a peat-based growing medium. **Applied Soil Ecology**. v. 153, p. 103579, 2020.

LI, F.; GUI, X.; JI, W.; ZHOW, C. Effect of calcium dihydrogen phosphate addition on carbon retention and stability of biochars derived from cellulose, hemicellulose, and lignin. **Chemosphere**, v. 251, p. 126335, 2020.

LI, J.; LI, B.; HUANG, H.; Lv, X.; ZHAO, N.; GUO, G.; ZHANG, D. Removal of phosphate from aqueous solution by dolomite-modified biochar derived from urban dewatered sewage sludge. **Science of the total environment**, v. 687, p. 460-469, 2019.

LIM, J.S; MANAN, Z.A; ALWI, S.R.W; HASHIM, H. A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy. **Renewable and sustainable energy reviews**, v.16, n.5, p.3084-3094, 2012.

LU, S. G.; SUN, F. F.; ZONG, Y. T. Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol). **Catena**, v. 114, p. 37-44, 2014.

- LUCA, T. H. I. de; MACKENZIE, M. D.; GUNDALE, M. J. Biochar effects on soil nutrient transformations. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (ed.). **Biochar for environmental management: science and technology**. London: Earthscan, 2009. cap. 14, p. 251-270.
- LUENGO, C. A; FELFLI, F. E. F; BEZZON, G. Pirólise e torrefação de biomassa. In: CORTEZ, L.A.B.; GÓMEZ, E.O.; LORA, E.E.S. **Biomassa para energia**. Campinas: Ed. Unicamp, 2008. cap. 5. p. 333-351.
- MA, P.; DING, W.; YUAN, J.; YI, L.; ZHANG, H. Total recycle strategy of phosphorus recovery from wastewater using granule chitosan inlaid with γ -ALOOH. **Environmental Research**, v. 184, p. 109309, 2020.
- MASUD, M. M.; LI, J. Y.; XU, R. K. Use of Alkaline Slag and Crop Residue Biochars to Promote Base Saturation and Reduce Acidity of an Acidic Ultisol. **Pedosphere**, v. 24, n. 6, p. 791-798, 2014.
- MOHAN, D.; PITTMAN JR, C. U.; STEELE, P. H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. **Energy & fuels**, v. 20, n. 3, p. 848-889, 2006.
- MUNDA, S.; BHADURI, D.; MOHANTY, S.; CHATTERJEE, D.; TRIPATHI, R.; SHAHID, M.; KUMAR, U.; BHATTACHARYYA, P.; KUMAR, A.; ADAK, T.; JANGDE, H. K.; NAYAK, A. K. Dynamics of soil organic carbon mineralization and C fractions in paddy soil on application of rice husk biochar. **Biomass and bioenergy**, v. 115, p.1-9, 2018.
- MUKHERJEE, C.; CHOWDHURY, R.; RAY, K. Phosphorus Recycling from an Unexplored Source by Polyphosphate Accumulating Microalgae and Cyanobacteria - A Step to Phosphorus Security in Agriculture. **Frontiers in Microbiology**, v. 6, 2015.
- NOVAK, J. M.; BUSSCHER, W. J.; LAIRD, D. L.; AHMEDNA, M.; WATTS, D. W.; NINANDOU, M. A. S. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plant soil. **Soil Science**, v. 174, n. 2, p. 105-112, 2009b.
- NOVAK, J. M.; LIMA, I.; XING, B.; GASKIN, J. W.; STEINER, C.; DAS, K. C.; SCHOMBERG, H. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. **Annals of Environmental Science**, v. 3, p. 195-206, 2009a.
- O'CONNOR, D.; PENG, T.; LI, G.; WANG, S.; DUAN, L.; MULDER, J.; CORNELISSEN, G.; CHENG, Z.; YANG, S.; HOU, D. Sulfur-modified rice husk biochar: A green method for the remediation of mercury contaminated soil. **Science of The Total Environment**, v. 621, p. 819-826, 2018.
- OLIVEIRA, N. C; PASCHOAL, A. R; PAULA, R. J.; CONSTANTINO, I. C; BISINOTI, M. C.; MOREIRA, A. B; PAULA, A. J. Morphological analysis of soil particles at multiple length-scale reveals nutrient stocks of Amazonian Anthrosols. **Geoderma**, v. 311, p. 58-66, 2018.
- OLMO, M.; VILLAR, R.; SALAZAR, P.; ALBUQUERQUE, J. A. Changes in soil nutrient availability explain biochar's impact on wheat root development. **Plant and Soil**, v. 399, n. 1-2, p. 333-343, 2016.
- PAN, X.; GU, Z.; CHEN, W.; LI, Q. Preparation of biochar and biochar composites and the application in a Fenton-like process for wastewater decontamination: A review. **Science of The Total Environment**, v. 754, p. 142104, 2020.
- PÉREZ, J.; MUNOZ- DORADO, J.; DE LA RUBIA, T. D. L. R.; MARTINEZ, J. Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. **International microbiology**, v. 5, n. 2, p. 53-63, 2002.
- PEGORARO, R. F; OLIVEIRA, D.; MOREIRA, C. G.; KONDO, M. K.; PORTUGAL, A. F. Partição de biomassa e absorção de nutrientes pelo feijoeiro comum. **Revista Caatinga**, v. 27, n. 3, p. 41-52, 2014.
- PETTER, F. A.; FERREIRA, T. S.; SINHORIN, A. P.; LIMA, L. B.; MORAIS, L. A.; PACHECO, L. P. Sorção e dessorção de diuron em Latossolo sob aplicação de biochar. **Bragantia**, v. 75, n. 4, p. 487-496, 2016.

PISA, C.; WUTA, M.; MUCHAONYERWA, P. Effects of incorporation of vermiculite on carbon and nitrogen retention and concentration of other nutrients during composting of cattle manure. **Bioresource Technology Reports**, v. 9, p. 100383, 2020.

QAYYUM, M.F.; ASHRAF, I.; ABID, M.; STEFFENS. Effect of biochar, lime, and compost application on phosphorus adsorption in a Ferralsol. **Journal of plant nutrition and soil science**, v. 178, n. 4, p. 576-581, 2015.

QIAN, T.; ZHANG, X.; HU, J.; JIANG, H. Effects of environmental conditions on the release of phosphorus from biochar. **Chemosphere**, v. 93, n. 9, p. 2069-2075, 2013.

RAAD, T. J.; PINHEIRO, P. C. D. C.; YOSHIDA, M. I. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do Eucalyptus spp. **Cerne**, v. 12, n. 2, p. 93-106, 2006.

RAMYA, R.; SHREE, M. P. 16S rRNA based T-RFLP Analysis of methanogens in biogas plant with P. Hysterophorus L. As Substrate. **International Journal of Current Research and Review**, v. 6, n. 24, p. 38, 2014.

REES, F.; SIMONNOT, M. O.; MOREL, J. L. Short-term effects of biochar on soil heavy metal mobility are controlled by intra-particle diffusion and soil pH increase. **European Journal of Soil Science**, v. 65, n. 1, p. 149-161, 2014.

REN, X.; ZHANG, P.; ZHAO, L.; SUN, H. Sorption and degradation of carbaryl in soils amended with biochars: influence of biochar type and content. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 3, p. 2724-2734, 2016.

SANTOS, F. A.; QUEIRÓZ, J. H. D.; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES, V. M.; REZENDE, S. T. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química nova**, v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012.

SARFRAZ, R.; HUSSAIN, A.; SABIR, A.; FEKIH, I. B.; DITTA, A.; XING, S. Role of biochar and plant growth promoting rhizobacteria to enhance soil carbon sequestration: a review. **Environmental monitoring and assessment**, v. 191, n. 4, p. 251, 2019.

SHARMA, A.; PAREEK, V.; ZHANG, D. Biomass pyrolysis: a review of modelling, process parameters and catalytic studies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 1081-1096, 2015.

SINGH, B.; SINGH, B. P.; COWIE, A. L. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. **Soil Research**, v. 48, n. 7, p. 516-525, 2010.

SINGH, C.; TIWARI, S.; GUPTA, V. K.; SINGH, J. S. The effect of rice husk biochar on soil nutrient status, microbial biomass and paddy productivity of nutrient poor agriculture soils. **Catena**, v. 171, p. 485-493, 2018.

SIZMUR, T.; QUILLIAM, R.; PUGA, A. P.; MORENO-JIMÉNEZ, E.; BEESLEY, L.; GOMES-EYLES, J. L. Application of biochar for soil remediation. **Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers**, p. 295-324, 2015.

SINGH, S. V.; CHATURVEDI, S.; DHYANI, V. C.; KASIVELU, G. Pyrolysis temperature influences the characteristics of rice straw and husk biochar and sorption/desorption behaviour of their bioreacomposite. **Bioresource Technology**, v. 314, p. 123674, 2020.

SOHI, S. P.; KRULL, E.; LOPEZ-CAPEL, E.; BOL, R. A review of biochar and its use and function in soil. *In: Advances in agronomy*, v. 105, p. 47-82, 2010.

TAGHIZADEH-TOOSI, A.; CLOUGH, T. J.; SHERLOCK, R. R.; CONDRON, L. M. Biochar adsorbed ammonia is bioavailable. **Plant and soil**, v. 350, n. 1-2, p. 57-69, 2012.

TAN, Z.; LAGERKVIST, A. Phosphorus recovery from the biomass ash: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 8, p. 3588-3602, 2011.

TAN, Z.; ZOU, J.; ZHANG, L.; HUANG, Q. Morphology, pore size distribution, and nutrient characteristics in biochars under different pyrolysis temperatures and atmospheres. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v.20, n.2, p.1036-1049, 2018.

TRAZZI, P. A.; HIGA, A. R.; DIECKOW, J.; MANGRICH, A. S.; HIGA, R. C. V. Biocarvão: realidade e potencial de uso no meio florestal. **Ciência Florestal**, v.28, n.2, p.875-887, 2018.

TURNER, B. L.; CONDRON, L. M.; RICHARDSON, S. J.; PELTZER, D. A.; ALISON, V. J. Soil organic phosphorus transformations during pedogenesis. **Ecosystems**, v. 10, n. 7, p. 1166-1181, 2007.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. **Foreign Agricultural Service**, 2020. p. 25. (Circular Series – WAP 2- 20).

VAN DER KOOIJ, S.; VAN VLIET, B.J.; STOMPH, T.J.; SUTTON, N.B.; ANTEN, N.P.; HOFFLAND, E. Phosphorus recovered from human excreta: A socio-ecological-technical approach to phosphorus recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v.157, p. 104744, 2020.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, v. 89, n. 5, p. 913-933, 2010.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 33, n. 4, p. 734-755, 2009.

WALLERSTEIN, D. Food-energy-water (FEW) nexus: Rearchitecting the planet to accommodate 10 billion humans by 2050. **Resources Conservation and Recycling**, v. 155, p. 104658, 2020.

WANG, L.; OK, Y. S.; TSANG, D. C.; ALESSI, D. S.; RINKLEBE, J.; WANG, H.; HOU, D. New trends in biochar pyrolysis and modification strategies: feedstock, pyrolysis conditions, sustainability concerns and implications for soil amendment. **Soil Use and Management**, v. 36, n. 3, p. 358-386, 2020.

WANG, T.; SUN, H.; REN, X.; LI, B.; MAO, H. Evaluation of biochars from different stock materials as carriers of bacterial strain for remediation of heavy metal-contaminated soil. **Scientific Reports**, v. 7, n. 12114, p. 1-10, 2017b.

WANG, Y.; LUI, Y.; LIU, R.; ZHANG, A.; YANG, S.; LIU, H.; ZHOU, Y.; YANG, Z. Biochar amendment reduces paddy soil nitrogen leaching but increases net global warming potential in Ningxia irrigation, China. **Scientific Reports**, v. 7, p. 1592, 2017a.

WARNOCK, D. D.; LEHMAN, J.; KUYPER, T. W.; RILLIG, M. C. Mycorrhizal responses to biochar in soil – concepts and mechanisms. **Plant and soil**, v. 300, n. 1-2, p. 9-20, 2007.

XIAOQIN, S.; DONGLI, S.; YUANHANG, F.; HONGDE, W.; LEI, G. Three-dimensional fractal characteristics of soil pore structure and their relationships with hydraulic parameters in biochar-amended saline soil. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p.104809, 2020.

XU, M.; GAO, P.; YANG, Z.; SU, L.; WU, J.; YANG, G.; XIAO, Y. Biochar impacts on phosphorus cycling in rice ecosystem. **Chemosphere**, v.225, p.311-319, 2019.

YILMAZ, H.; LAUWERS, L.; BUYSSE, J.; VAN HUYLENBROECK, G. Economic aspects of manure management and practices for sustainable agriculture in Turkey. **Present Environmental and Sustainable Development**, v. 13, n. 1, p. 249-263, 2019.

YUAN, J. H.; XU, R. K.; ZHANG, H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. **Bioresource technology**, v. 102, n. 3, p. 3488-3497, 2011.

ZHANG, J.; SUNG, G.; LIU, J.; EVRENDILEK, F.; BUYUKADA, M. Co- combustion of textile dyeing sludge with cattle manure: Assessment of thermal behavior, gaseous products, and ash characteristics. **Journal of Cleaner Production**, v. 253, p. 119950, 2020.

ZHANG, S.; DONG, Q.; ZHANG, L.; XIONG, Y. High quality syngas production from microwave pyrolysis of rice husk with char-supported metallic catalysts. **Bioresource technology**, v. 191,p. 17-23, 2015.

ZHANG, S.; DU, Q.; CHENG, K.; ANTONIETTI, M.; YANG, F. Efficient phosphorus recycling and heavy metal removal from wastewater sludge by a novel hydrothermal humification-technique. **Chemical Engineering Journal**, v. 394, p. 124832, 2020.

ZHANG, S.; XIONG, Y. Washing pretreatment with light bio-oil and its effect on pyrolysis products of bio-oil and biochar. **RSC Adv.**, v. 6,n. 7, p. 5270-5277, 2016.

ZHOU, C.; HEAL, K.; TIGABU, M.; XIA, L.; HU, H.; YIN, D.; MA, X. Biochar addition to forest plantation soil enhances phosphorus availability and soil bacterial community diversity. **Forest Ecology and Management**, v. 455, p. 117635, 2020.

ZIMMERMAN, A. R; OUYANG, L. Priming of pyrogenic C (biochar) mineralization by dissolved organic matter and vice versa. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 130, p. 105-112, 2019.

4 ARTIGOS

4.1 Artigo 1 – Disponibilidade de fósforo em solos adubados com biochar de casca de arroz e de esterco bovino e cultivado com feijoeiro

Elaborado conforme as normas da revista Ciência e Agrotecnologia.

Disponibilidade de fósforo em solos adubados com biochar de casca de arroz e de esterco bovino e cultivado com feijoeiro

Resumo: Os solos do Cerrado Brasileiro são geralmente ácidos e com baixa disponibilidade de nutrientes, portanto o uso de insumos alternativos para melhorar a fertilidade deve ser investigado. Os objetivos deste estudo foram avaliar o potencial dos biochars de casca de arroz (BCA) e de esterco bovino (BEB) no aumento da disponibilidade de fósforo e seus efeitos nas propriedades químicas do solo e nas plantas de feijoeiro. Os experimentos foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4x2+3, com quatro repetições. Os tratamentos foram quatro doses de biochar (1, 2, 3 e 4% (m/v, massa do condicionador/volume de solo), dois biochars (biochar de esterco bovino leiteiro e biochar de casca de arroz) e três tratamentos adicionais (C1, sem calagem e sem fertilização; C2, adição de carbonato de Ca e Mg (P.A) e fertilizantes N, P, K e; C3, adição de silicato de Ca e Mg e fertilizantes N. Nas maiores doses de BCA, houve aumento de 2,7, 5,3 e 2,5 vezes no teor de P extraído por Mehlich 1 e quantificado por colorimetria, por Mehlich 1 e quantificado por espectroscopia e por resina de troca iônica e quantificado por espectroscopia, respectivamente em relação ao C1. Para as doses mais altas de BEB, os aumentos no conteúdo de P foram 51,3, 289,2 e 88,4 vezes maiores que em C1, respectivamente, de acordo com os métodos descritos para o BCA. Os biochars aumentaram o pH do solo, a CTC, os teores nutrientes e o crescimento do feijoeiro em relação ao C1, especialmente o BEB. No entanto a produção de matéria seca foi significativamente menor que no C2.

Termos para indexação: fertilidade do solo, pirólise, *Phaseolus vulgaris* L., fósforo; silício.

Phosphorus availability in soil amended with biochar from rice husk and cattle manure and cultivated with common bean

Abstract: The soils of the Brazilian Savanna are generally acidic and have low availability of nutrients, so the use of alternative inputs to improve their fertility should be investigated. The objectives of this study were to evaluate the potential of biochars from rice husk (BCA) and from bovine manure (BEB) in increasing phosphorus availability and their effects on soil chemical properties and in common beans

plants. The experiments were carried out in a completely randomized design, in a 4x2+3 factorial scheme with four replicates. The treatments were four biochar doses (1, 2, 3 and 4% (m/v)= conditioner mass/soil volume), two biochars (BCA and BEB) and three additional treatments (C1, no liming and no fertilization; C2, addition of Ca and Mg carbonate (P.A) and N, P, K fertilizers and; C3, addition of Ca and Mg silicate and N, K fertilizers). In the highest doses of BCA there was an increase of 2.7, 5.3 and 2.5 times in the P content extracted by Mehlich 1 and quantified by colorimetry, by Mehlich 1 and quantified by spectroscopy and by ion exchange resin and quantified by spectroscopy, respectively in relation to C1. For the highest doses of BEB, the increases in P content were 51.3, 289.2 and 88.4 times greater than in C1, respectively, according to the methods described for BCA. The biochars increased soil pH, CTC, nutrient content and the growth of bean plants compared to C1, especially BEB. However, the production of dry matter was significantly lower than that obtained in C2.

Index terms: Soil fertility; pyrolysis; *Phaseolus vulgaris* L.; phosphorus; silicon.

Introdução

O uso do biocarvão ou biochar na agricultura se justifica pela possibilidade de reciclar grandes quantidades de resíduos orgânicos (ABDELHAFEZ; LI; ABBAS, 2014) e seu potencial de redução de contaminantes associados a esses resíduos (AHMAD *et al.*, 2014; WAQAS *et al.*, 2014, GWENZI *et al.*, 2015). Biochar é um termo idealizado, a partir do conhecimento da Terra Preta de Índio, encontrada na Região Amazônica (LEHMANN; RONDON, 2006), definida como um produto rico em carbono obtido, a partir da transformação termoquímica de biomassa em um ambiente livre ou com baixa concentração de oxigênio (KOOKANA *et al.*, 2011).

Na literatura, existem vários benefícios de incorporar biochar ao solo e melhorar as propriedades químicas, físicas e biológicas (CHAN *et al.*, 2007; UZOMA *et al.*, 2011; ALBUQUERQUE *et al.*, 2014), remediação de orgânicos e inorgânicos contaminantes (MÉNDEZ *et al.*, 2012; ALBURQUERQUE *et al.*, 2014) e incorporação de formas de carbono mais estáveis no solo (KOOKANA *et al.*, 2011; Paz-FERREIRO *et al.*, 2018). Alguns autores verificaram o aumento da disponibilidade de fósforo em solos fertilizados com biocarvão e esse aumento de fósforo pode estar associado à sílica solúvel presente nas cinzas do biocarvão (LIU *et al.*, 2014) e ao aumento do pH e da capacidade de troca catiônica de solos ácidos com capacidade de fixação de fósforo (SILVA *et al.*, 2017; ZELAYA *et al.*, 2019).

Este efeito dos biochars na disponibilidade de fósforo é importante especialmente em solos altamente intemperizados e ácidos, onde ocorre uma forte interação entre os ânions fosfato ($H_2PO_4^-$ e HPO_4^{2-}), e os oxi-hidróxidos de ferro e alumínio, diminuindo a disponibilidade de fósforo para as plantas com o tempo (YUAN; XU, 2012; ABDALA *et al.*, 2015). Além disso, em solos mais arenosos do Cerrado Brasileiro, com menor capacidade de adsorção de fósforo que os mais argilosos, pela baixa disponibilidade desse nutriente, existe uma grande preocupação com a fertilização fosfatada (Donagemma *et al.*, 2016). Segundo Petter e Mandari (2012), o uso de biochar como condicionador de

solo no Cerrado Brasileiro é uma alternativa futura promissora para melhorar as propriedades do solo e a produção de culturas.

Assim, os efeitos do biochar sobre a disponibilidade de fósforo no solo são especialmente importantes, porque as fontes naturais desse nutriente são não renováveis, finitas e devem se esgotar nos próximos 50-100 anos (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009). Alguns autores relataram aumentos significativos na disponibilidade de fósforo, em solos fertilizados com biochar (SILVA *et al.*, 2017; ZELAYA *et al.*, 2019), mas os mecanismos que justificam esses aumentos não são suficientemente claros.

Neste estudo, hipotetizamos que os biochars são (i) fontes de fósforo e silício solúvel, que influenciam a disponibilidade de fósforo no solo, (ii) atua como um condicionador do solo, melhorando suas propriedades químicas e (iii) contribui para aumentar a produtividade da matéria seca de feijoeiro. Assim, os objetivos deste estudo foram avaliar o potencial dos biochars de esterco bovino e da casca de arroz no aumento da disponibilidade de fósforo e seus efeitos nas propriedades químicas do solo e na produção de feijão, como planta indicadora.

Material e Métodos

O estudo foi realizado em duas etapas, no Instituto de Ciências Agrárias (ICA) da Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil. Na primeira etapa, os tratamentos foram incubados no solo e, na segunda etapa, foram cultivados os feijoeiros. Os experimentos foram conduzidos em vasos, em casa de vegetação, em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4x2+3 (quatro doses de biochar, dois tipos de biochar e três tratamentos adicionais) com quatro repetições (n = 44), conforme delineado na Tabela 1.

Tabela 1 – Esquema de tratamentos utilizados no experimento

Biochars											
Biochar de esterco bovino				Biochar de casca de arroz				Tratamentos adicionais*			
Doses (% m/v)				Doses (% m/v)							
1	2	3	4	1	2	3	4	C1	C2	C3	

*C1: (sem calagem e sem fertilização); C2: (adição de carbonato de Ca e Mg (P.A), N, P e K); C3: (adição de silicato de Ca e Mg e N e K); (m/v) = massa do condicionador/volume de solo).

As doses de cada biochar foram de 1, 2, 3 e 4% massa de biochar / volume de solo (m / v), o que correspondeu a 17,86; 35,71; 53,57 e 71,43 cm³ dm⁻³ para o biochar de casca de arroz e 18,52; 37,04; 55,56 e 74,04 cm³ dm⁻³ para o biochar de esterco bovino. Os tratamentos adicionais (controles) foram: controle 1, sem calagem e sem fertilização; controle 2, adição de carbonato de cálcio, carbonato de magnésio e nitrogênio, fertilizantes minerais de P e K e; controle 3, adição de silicato de cálcio e magnésio e fertilizantes minerais de N e K. No tratamento controle 2 (C2) foram adicionados carbonato de cálcio e magnésio (P.A) (relação Ca: Mg 4: 1), a fim de aumentar a saturação por bases do solo para 60% e 120 mg dm⁻³ de P na forma de fosfato de amônio. Para o tratamento controle 3 (C3), foram

adicionados silicato de cálcio e magnésio (34,9% CaO, 9,9% MgO e 22,4% SiO₂ solúvel com o objetivo de aumentar a saturação de base do solo para 60%.

Foi utilizada a camada superficial de 0 a 20 cm de profundidade de um Latossolo Vermelho – Amarelo, classificado de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2018), sob vegetação de Cerrado (Cerrado). As propriedades físicas e químicas do solo, determinadas de acordo com Teixeira *et al.* (2017), foram: textura da camada superficial classificada como arenosa (areia = 780 g kg⁻¹; silte = 100 g kg⁻¹; argila = 120 g kg⁻¹; pH (H₂O) = 5,0; P disponível (resina método) = 1,8 mg dm⁻³; K = 17 mg dm⁻³; Ca = 0,25 cmol_c dm⁻³; Mg = 0,12 cmol_c dm⁻³; Al = 0,42 cmol_c dm⁻³; saturação de base = 12,7%; capacidade de troca catiônica pH 7,0 = 3,25 cmol_c dm⁻³ e C orgânico do solo = 10,6 g kg⁻¹. O P remanescente, 28 mg L⁻¹, foi determinado de acordo com Alvarez *et al.* (2000).

O esterco de gado, usado como matéria-prima do biochar, foi coletado em uma área de alimentação de vacas leiteiras. A partir do estrume fresco, foram produzidas esferas de aproximadamente 4 cm de diâmetro e secas a 103 ± 2 ° C até a desidratação completa. Para a produção do biochar, as esferas secas foram acondicionadas em uma caixa de aço dentro de uma mufla industrial. A temperatura foi elevada a uma taxa de aproximadamente 5 ° C / min até 450 ° C (a temperatura foi controlada por um termopar inserido no centro da massa carbonizada) com um tempo de residência de 30 min. Para a produção do biochar da casca de arroz (cuja matéria-prima foi adquirida em uma empresa de beneficiamento no município de Montes Claros - MG), foram adotados os mesmos procedimentos descritos para as esferas secas de esterco bovino (Figura 1).

Tanto o biochar de esterco bovino quanto o de casca de arroz foram moídos manualmente e passados por uma peneira com malha de 0,25 mm para a caracterização química e aplicação ao solo.

As matérias-primas foram caracterizadas quanto às concentrações de nutrientes de acordo com Tedesco *et al.* (1995): casca de arroz (média, n = 4): 3,1 g kg⁻¹ de N total, 4,7 g kg⁻¹ de P; 10,6 g kg⁻¹ de Ca, 14,8 g kg⁻¹ de Mg, 0,05 g kg⁻¹ de S; esterco bovino (média, n = 4): 17,4 g kg⁻¹ de N total, 29,6 g kg⁻¹ de P; 25,0 g kg⁻¹ de Ca, 6,4 g kg⁻¹ de Mg, 4,3 g kg⁻¹ de S.

Os dois biochars foram caracterizados quanto ao pH, densidade e condutividade elétrica, de acordo com Rajkovich *et al.*, (2012). As cinzas foram determinadas de acordo com o procedimento descrito em ASTM D1762-84; o carbono e o nitrogênio totais foram determinados por analisador elementar e os demais nutrientes e oligoelementos foram determinados por ICP-MS / MS, após digestão por microondas, de acordo com o método USEPA 3051. A caracterização dos biochars e as quantidades de nutrientes e elementos-traço, adicionados ao solo pelos respectivos biochars, são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Caracterização do biochar de casca de arroz (BCA) e do biochar de esterco bovino (BEB), quantidades de BCA e BEB, nutrientes e elementos-traço adicionados ao solo pelos respectivos biochars. Média (n=4)

Atributo	Caracterização do biochar		Biochar e nutrientes e elementos-traço adicionados ao solo								
	BCA	BEB	BCA doses (% m/v)				BEB doses (%m/v)				
			1	2	3	4	1	2	3	4	
pH	7,3	9,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cond.Eletr. ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	178	411	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Densidade (g cm^{-3})	0,56	0,54	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cinzas(%)	24,5	36,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Comp.voláteis (%)	65,4	43,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Carbono fixo (%)	6,2	12,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biochar (g kg^{-1})	-	-	10	20	30	40	10	20	30	40	
C Total (g kg^{-1})	91,84	167,9	1,64	3,28	4,92	6,56	3,11	6,22	9,33	12,44	
N Total (g kg^{-1})	1,96	6,43	0,04	0,07	0,10	0,14	0,12	0,24	0,36	0,48	
P (g kg^{-1})	14,17	32,67	0,25	0,51	0,76	1,01	0,61	1,21	1,82	2,42	
K (g kg^{-1})	1,90	5,40	0,03	0,07	0,10	0,14	0,10	0,20	0,30	0,40	
Ca (g kg^{-1})	12,10	19,33	0,22	0,43	0,65	0,86	0,36	0,72	1,07	1,43	
Mg (g kg^{-1})	18,14	23,22	0,32	0,65	0,97	1,30	0,43	0,86	1,29	1,72	
Na (g kg^{-1})	<0,01	1,08	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	
S (g kg^{-1})	0,32	0,70	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,03	0,04	0,05	
Fe (mg kg^{-1})	7,22	375,3	0,13	0,26	0,39	0,52	6,9	13,9	20,8	27,8	
Zn (mg kg^{-1})	21,50	100,4	0,38	0,77	1,15	1,54	1,86	3,72	5,58	7,44	
Mn (mg kg^{-1})	44,91	82,08	0,80	1,60	2,41	3,21	1,52	3,04	4,56	6,08	
Cu (mg kg^{-1})	9,63	15,28	0,17	0,34	0,52	0,69	0,28	0,57	0,85	1,13	
B (mg kg^{-1})	2,24	6,64	0,04	0,08	0,12	0,16	0,12	0,25	0,37	0,49	
Ni (mg kg^{-1})	21,28	0,30	0,38	0,76	1,14	1,52	0,01	0,01	0,02	0,02	
Cd (mg kg^{-1})	0,15	0,33	<0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	
Pb (mg kg^{-1})	0,16	0,42	<0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	

O solo e seus respectivos tratamentos foram acondicionados em vasos de 1 litro e incubados por 20 dias com umidade mantida próxima à capacidade de campo. Após o período de incubação, o solo de casa vaso foi homogeneizado, e uma amostra foi retirada para a análise química. A fertilização com 100 mg dm^{-3} de potássio e 36 mg dm^{-3} de nitrogênio, na forma de nitrato de potássio, foi realizada em

todos os tratamentos, exceto em C1. Os solos foram devolvidos aos vasos, e quatro sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) foram semeadas. Sete dias após a semeadura, ocorreu o desbaste, restando apenas duas plantas por vaso, as quais foram cultivadas por 50 dias, mantendo a umidade do solo próxima à capacidade de campo.



Figura 1 – Esquema representativo A) esferas confeccionadas a partir de esterco bovino para a produção de biochar; B) e C) biochar de esterco bovino e biochar de casca de arroz, respectivamente, antes da trituração mecânica; D) feijoeiro comum aos nove dias após a semeadura

Fonte: Do autor.

Durante o período vegetativo, foram realizadas três adubações de cobertura aos 13, 26 e 34 dias de semeadura com 45 mg dm^{-3} de N na forma de ureia, exceto C1.

Ao final do período experimental, as plantas foram colhidas, separadas em parte aérea e raízes, lavadas com água destilada e acondicionadas em sacos de papel. Em seguida, foram secas em estufa de circulação forçada de ar a $65\text{-}70^{\circ}\text{C}$ (± 72 horas) até massa constante para a obtenção da produção da matéria seca.

Nas amostras de solo de cada vaso, coletadas após 20 dias de incubação com seus respectivos tratamentos (primeira etapa), foram realizadas as seguintes análises, segundo Teixeira *et al.*, (2017): carbono total pelo método de combustão a seco usando um analisador elementar; pH em água; P extraído pela solução de Mehlich 1 e quantificado por colorimetria com molibdato de amônio; P extraído pela solução de Mehlich 1 e por resina de troca iônica e quantificado por espectrometria (espectrometria de massa indutivamente acoplado – ICP – MS/MS); Al, Ca e Mg trocáveis; capacidade de troca catiônica; saturação por bases e Si solúvel.

Os dados foram submetidos à análise de variância e, quando significativos, os biochars foram comparados pelo teste F ($p < 0,05$) e cada dose foi comparada individualmente com cada tratamento

pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$). Para as doses de biochar, as equações de regressão foram ajustadas. As análises estatísticas foram realizadas por meio do *software* R.

Resultados e Discussão

Os biochars de esterco bovino (BEB) e de casca de arroz (BCA) aumentaram o carbono total do solo (CT), quando comparados aos tratamentos C1 (sem calagem e sem fertilização), C2 (com aplicação de carbonato de cálcio e de magnésio, N, P e K) e C3 (com aplicação de silicato de cálcio e de magnésio, N e K), exceto na dose de 1% de BCA que foi semelhante aos tratamentos controles (Tabela 3). As doses de BCA e BEB aumentaram linearmente o carbono total do solo e não houve diferenças entre os biochars para essa variável (Tabela 3). Os aumentos no carbono total do solo eram previsíveis, uma vez que os biochars são fontes desse elemento (Tabela 1). Além disso, os biochars incorporam formas mais estáveis de carbono ao solo, aumentando seus estoques ao longo do tempo (GWENZI *et al.*, 2016).

Para o pH do solo verificou-se que a adição de biochar diminuiu a acidez do solo em relação ao tratamento C1, exceto para as doses 1% e 2% de BCA (Tabela 3). As doses de BCA de 3% e 4% tiveram efeitos semelhantes aos dos silicatos (C3) e dos carbonatos (C2), respectivamente. O BEB, independente da dose, elevou o pH do solo para valores superiores aos dos carbonatos (C2) e dos silicatos (C3). O pH do solo aumentou linearmente com as doses de biochar e o BEB foi mais eficaz em corrigir a acidez do solo que o BCA (Tabela 3). Esses resultados indicam que, embora existam diferenças entre os biochars, eles atuaram como corretivos da acidez do solo.

Os efeitos dos biochars no aumento do pH do solo estão relacionados às cinzas produzidas durante o processo de pirólise (STEENARI; KARLSSON; LINDQVIST, 1999; GLASER; LEHMANN; ZECH, 2002; SILVA *et al.*, 2017). As cinzas são ricas em bases, como carbonato de potássio (KHCO_3) e carbonato de cálcio (CaCO_3), que atuam como corretivos da acidez do solo e aumentam os teores de bases trocáveis (DOMINGUES *et al.*, 2017).

Tabela 3 – Equações de regressão ajustadas para carbono total (CT), pH em água, alumínio trocável, fósforo disponível extraído pela solução de Mehlich 1 e determinado por colorimetria (P Mehl. C) e por espectrometria de plasma (P Mehl. E) e extraído por resina de troca iônica e determinado por espectrometria de plasma (P Res. E) e sílica solúvel (Si) no solo após aplicação de biochar

Atributo	C1	C2	C3	Biochar de casca de arroz					Biochar de estercobovino				
				1	2	3	4	Média	1	2	3	4	Média
CT g kg ⁻¹	10,32a	10,62b	10,12c	10,20abc	11,91	14,22	17,90	13,57A	11,12	15,11	15,12	17,60	14,74A
					y = 7,21+2,542**x R ² = 0,97					y = 9,99+2,021**x R ² = 0,90			
pH – H ₂ O	4,90a	5,50b	5,21c	5,00a	5,05a	5,25c	5,55b	5,21B	5,80	6,41	7,03	7,51	6,69A
					y = 4,75+0,185**x R ² = 0,92					y = 5,25+ 0,575**x R ² = 0,99			
Al cmolc dm ⁻³	0,47a	0,01b	0,07c	0,22	0,30	0,22	0,20	0,24A	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00B
					y = 0,24					y = 0,0			
P Mehl.C mg dm ⁻³	0,69a	14,31b	0,53c	0,89	1,10	1,33	1,87	1,30B	10,59	21,11	156,25	177,5	91,36A
					y = 0,51+0,317**x R ² = 0,94					y = - 67,61+63,587**x R ² = 0,87			
P Mehl. E mg dm ⁻³	0,33	20,92	0,36	0,73	0,92	1,41	1,75	1,20B	15,75	30,52	67,6	98,42	53,07A
					y = 0,32+0,355**x R ² = 0,98					y = - 18,2+28,509**x R ² = 0,98			
P Res. E mg dm ⁻³	1,60	26,01	3,00	2,4	2,6	3,2	4,1	3,08B	12,08	27,40a	81,44	142,23	65,79A
					y = 1,65+0,57**x R ² = 0,93					y = - 45,34+44,449**x R ² = 0,96			
Si mg dm ⁻³	1,08	1,02	1,74c	1,42	1,58	1,74c	2,00	1,69A	1,03	1,50	2,13	3,16	1,96A
					y = 1,21+0,19**x R ² = 0,98					y = 0,20+0,702**x R ² = 0,97			

C1 (sem calagem e sem fertilização); C2 (adição de carbonato de Ca e Mg, N, P e K); C3 (adição de silicato de Ca e Mg, N e K). As letras minúsculas na linha comparam cada tratamento controle com cada uma das doses de biochar. Sem letra minúscula, indica diferenças significativas entre os tratamentos controle e as doses de biochar. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste Dunnett ($p < 0,05$). Médias das doses de biochar seguidas da mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste F ($p < 0,05$).

Os biochars reduziram o Al trocável no solo, mas não houve efeito das doses. O BEB neutralizou completamente o alumínio trocável, possivelmente pelo seu maior teor de cinzas (Tabela 3). Por outro lado, embora o BCA tenha reduzido o Al trocável, em relação ao tratamento C1, teve menor efeito que os tratamentos C2 e C3 como corretivo da acidez do solo. A redução das formas tóxicas de Al pelos biochars está relacionada à conversão de Al^{+3} em $Al(OH)^{+2}$, $Al(OH)_2^+$ e $Al(OH)_3$ por reações de precipitação com o aumento do pH e por reações de adsorção de monômeros $Al(OH)^{+2}$ e $Al(OH)_2^+$ nos grupos carboxila presentes nos biochars (QIAN; CHEN; HU, 2013; TANG *et al.*, 2013).

A disponibilidade de P no solo extraído pela solução de Mehlich 1 e determinado por colorimetria (P Mehl. C) e por ICP – MS/MS (P Mehl. E) e extraída por resina de troca iônica e determinada por ICP – MS/MS (P Res. E), nos tratamentos que receberam BCA, independente da dose, foram superiores aos obtidos em C1 e C3, em que esse nutriente não foi adicionado (Tabela 3). Por outro lado, a disponibilidade de P no solo, nos tratamentos de BCA, foi menor que no C2 que recebeu 120mg dm^{-3} desse elemento como fosfato de amônio. Apesar do pequeno aumento, a disponibilidade de P no solo aumentou linearmente com as doses de BCA (Tabela 3). Para os tratamentos com BEB, exceto para a dose de 1% de biochar, a disponibilidade de P no solo (P Mehl. C, P Mehl. E e P Res. E) foi maior que nos tratamentos C1, C2 e C3 (Tabela 3).

Diferentes metodologias de determinação de P foram utilizadas neste estudo, uma vez que tanto o extrator quanto as altas concentrações de sílica, presentes no biochar, podem influenciar na quantificação de P. O extrator de Mehlich1 é influenciado pela capacidade de fixação de P no solo e pode extrair formas de P não disponíveis, ligadas ao Ca, quando comparado à resina de troca iônica. Para a quantificação de P, foram utilizados os métodos colorimétrico e espectrométrico. No método colorimétrico, tanto o P quanto o Si reagem com o molibdato, o que resulta na formação do fósforo-molibdato e do complexo sílico-molíbico, respectivamente, que absorvem o mesmo comprimento de onda (CABALLERO; BADEL; LUNA, 2017). Assim, a presença de silicato no biochar pode subestimar a disponibilidade de P no solo. Para eliminar a interferência do P e de outros elementos, na determinação do Si, geralmente, são adicionados ácidos orgânicos, como os ácidos tartárico e oxálico (NOLLA *et al.*, 2010). Na análise de P, o ácido ascórbico é utilizado como reagente redutor da reação do fosfato com o molibdato em meio ácido (SANTOS; SILVA; GRIEBELER, 2014). De acordo com os resultados da análise de solo dos tratamentos C1 e C3, verificou-se que o silício adicionado como silicato de cálcio e magnésio não interferiu, na determinação do P disponível pelos diferentes métodos, utilizados neste estudo, uma vez que não houve diferenças entre os tratamentos e entre os métodos colorimétrico e espectrométrico (Tabela 3). Assim, os biochars aumentaram significativamente a disponibilidade de P no solo.

Além dos biochars serem fontes de P, o aumento do pH capaz de reduzir as reações de fixação do P e a competição do Si pelos sítios de adsorção da argila Carvalho *et al.*, (2001) podem explicar a alta disponibilidade desse nutriente no tratamento C3, que recebeu aplicação de silicato e, nos tratamentos com BEB, que apresenta maiores teores de cinzas e Si (Tabela 3). De acordo com os valores do P remanescente (28 mg L^{-1}), em condições naturais, o solo apresenta capacidade mediana de fixação de fósforo. O fósforo remanescente é um método mais rápido e simples, para estimar a capacidade de

fixação de P, adaptado por Alvarez *et al.* (2000), a partir da técnica conhecida como sorção de valor único (ROGERI *et al.*, 2017).

Outros autores também verificaram um aumento na disponibilidade de P, utilizando o biochar como corretivo do solo, por adição desse nutriente pelo próprio biochar, aumentando o pH do solo e a matéria orgânica, o que diminui as reações de fixação de P (YUAN; XU, 2012; ABDALA *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2017).

Em relação ao Si solúvel, verificou-se que a adição de silicato (tratamento C3) aumentou a disponibilidade desse elemento no solo, quando comparado aos tratamentos C1 e C2 (Tabela 3). Os biochars também aumentaram a disponibilidade de Si solúvel no solo em relação aos tratamentos C3. Para os dois biochars, houve aumento linear na disponibilidade de Si solúvel com as doses e não houve diferenças entre eles. A casca de arroz e o esterco bovino possuem silício em sua composição, já que as gramíneas são plantas que acumulam esse elemento em seus tecidos. Assim, biochars são considerados fontes de liberação lenta de Si para o solo (WANG; XIAO; CHEN, 2018).

Além dos efeitos sobre a disponibilidade de P, o Si pode reagir com as formas trocáveis do alumínio, reduzindo os efeitos da acidez do solo nas plantas (QIAN; CHEN, 2014). O Si também pode reagir com o C do próprio biochar e aumentar sua estabilidade no solo (WANG; XIAO; CHEN, 2018).

Para o K trocável, maiores valores foram obtidos, nos tratamentos com biochars, em relação aos tratamentos C2 e C3 (Tabela 4), em que esse nutriente foi adicionado via fertilizantes minerais. Tanto para BCA quanto para BEB, houve um aumento linear do K com as doses de biochars. Para Ca e Mg trocáveis, os valores obtidos, nos tratamentos BCA, foram inferiores aos observados nos tratamentos C2 e C3, que receberam aplicação desses nutrientes via corretivos de acidez do solo (Tabela 4). Por outro lado, nos tratamentos com BEB, os valores de Ca e Mg foram superiores aos dos tratamentos C2 e C3. Um aumento linear de Ca foi observado com as doses de BCA e BEB e um aumento linear de Mg com as doses de BEB. Assim, o BEB proporcionou ao solo maiores quantidade de bases trocáveis (K, Ca e Mg) que BCA (Tabela 4).

Certamente, pela redução da acidez do solo e aumento das bases trocáveis, houve um aumento linear da capacidade de troca catiônica (CTC) e da saturação por bases (V) com a aplicação do biochar (Tabela 4). Porém os valores da CTC e V, nos tratamentos com BCA, foram superiores aos obtidos, nos tratamentos C2 e C3, apenas na dose 4%. Por outro lado, para BEB, já na primeira dose (1%) a CTC e V foram superiores aos tratamentos C2 e C3 (Tabela 4).

Tabela 4 – Equações de regressão ajustadas para potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V) no solo após a aplicação de biochar

Atributo	C1	C2	C3	Biochar de casca de arroz					Biochar de estercobovino				
				1	2	3	4	Média	1	2	3	4	Média
K mg dm ⁻³	15,00a	48,01b	73,51c	115	129	148	156	137B	244	348	446	514	388A
				$y = 101,5 + 14,2^{**}x$ R ² = 0,98					$y = 161 + 90,8^{**}x$ R ² = 0,99				
Ca cmol _c dm ⁻³	0,27a	1,20b	0,98c	0,26a	0,24a	0,31a	0,34	0,29B	1,06c	1,57	1,66	1,75	1,51A
				$y = 0,21 + 0,031^{**}x$ R ² = 0,77					$y = 0,97 + 0,22^{**}x$ R ² = 0,82				
Mg cmol _c dm ⁻³	0,15a	0,41b	0,39c	0,18a	0,15a	0,17a	0,16a	0,17B	0,29c	0,61	0,92	1,32	0,79A
				$y = 0,17$					$y = -0,07 + 0,34^{**}x$ R ² = 0,99				
CTC cmol _c dm ⁻³	3,40a	3,46b	3,59c	3,22	3,35a	3,56bc	3,72	3,49B	3,85	4,46	4,71	5,16	4,55A
				$y = 3,04 + 0,161^{**}x$ R ² = 0,96					$y = 3,50 + 0,418^{**}x$ R ² = 0,98				
V %	16a	50b	41c	21	20	26	28	23,75B	51b	69	79	85	71A
				$y = 17,0 + 2,71^{**}x$ R ² = 0,82					$y = 43 + 11,2^{**}x$ R ² = 0,94				

C1 (sem calagem e sem fertilização); C2 (adição de carbonato de Ca e Mg, N, P e K); C3 (adição de silicato de Ca e Mg, N e K). As letras minúsculas na linha comparam cada tratamento controle com cada uma das doses de biochar. Sem letra minúscula, indica diferenças significativas entre os tratamentos controle e as doses de biochar. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste Dunnett ($p < 0,05$). Médias das doses de biochar seguidas da mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste F ($p < 0,05$).

Os biochars reduziram o Al trocável no solo, mas não houve efeito das doses. O BEB neutralizou completamente o Al trocável, possivelmente por seu maior teor de cinzas (Tabela 3). Por outro lado, o BCA, embora tenha reduzido o Al trocável em relação ao tratamento C1, teve menos efeito que os tratamentos C2 e C3 como corretivo da acidez do solo.

Para a massa seca da parte aérea (MSPA) e raízes (MSRA), maiores rendimentos foram observados nos tratamentos C2 e C3 (Tabela 5). Apesar disso, os biochars demonstraram eficiência, já que suas doses aumentaram linearmente a biomassa do feijoeiro, especialmente o BEB que, na dose 4%, foi 1,08 vezes superior ao tratamento C3 (com correção da acidez e fertilização) para MSRA. Também, nos tratamentos com biochars, a MSPA e MSRA foram maiores que no tratamento C1 (sem calagem e sem fertilização). Embora as plantas não apresentassem sintomas visuais de deficiência de P e a disponibilidade de P nos tratamentos com BEB fosse elevada, uma possível explicação seria que a produtividade das plantas foi limitada pelo P, pela ocorrência de algum desbalanço nutricional. Além disso, as características morfofisiológicas dos vegetais influenciadas por aspectos genéticos têm papel decisivo nas quantidades de nutrientes absorvidas pelas plantas e nos processos cinéticos de absorção (MARSCHNER, 1995). Também outros possíveis efeitos dos corretivos de acidez do solo podem ter afetado a produtividade das plantas, uma vez que os tratamentos com biochar não receberam aplicação desses insumos. Como observado para o P, nenhum outro sintoma visual de deficiência nutricional ou toxicidade foi encontrado no feijoeiro.

De acordo com Santos *et al.*, (2019), embora as associações de biochars com fertilizantes fosfatados solúveis aumentem a disponibilidade de P no solo, nem sempre proporcionam maior eficiência de uso desse nutriente pelas plantas, o que implica, segundo os autores, que outras estratégias devem ser adotadas, a fim de aumentar a absorção e a utilização de P pelas culturas na correção do solo com biochars.

Embora maiores produções de massa seca de plantas de feijoeiro tenham sido observadas nos tratamentos C2 e C3, uma relação MSPA/MSRA mais baixa foi observada nos tratamentos com biochars (Tabela 5). Em geral, maior produtividade de raízes tem sido observada em solos que receberam aplicação de biochar, especialmente de raízes finas (SILVA *et al.*, 2017; ZELAYA *et al.*, 2019). Esses resultados podem estar relacionados a mudanças no metabolismo vegetal (HAIDER *et al.*, 2015; VIRGER *et al.*, 2015) e morfologia (RAZAQ *et al.*, 2017), melhoria das relações planta-microrganismo (SPOKAS; BAKER; REICOSKY, 2010; SONG *et al.*, 2016) e nas propriedades físicas do solo por biochars (AMENDOLA *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2017), que podem favorecer o maior crescimento do sistema radicular da planta.

A Figura 2 resume os efeitos da aplicação de biochar nas propriedades do solo e na produção do feijoeiro. Os valores relativos foram obtidos em relação ao tratamento referência, Controle (100%), que receberam aplicação de corretivos da acidez do solo e fertilização com N, P e K. Para os tratamentos com biochar, foi considerada a maior dose (4%). Os biochars BCA e BEB aumentaram significativamente os teores de C total e Si, em relação ao tratamento Controle 2 (Figura 2A) e foram eficientes na neutralização da acidez do solo. Contudo o BCA aumentou o pH do solo em 1,02 vezes em relação ao Controle 2. Em relação ao P extraído por resina de troca iônica e determinado por

colorimetria (P-RE), os teores desse elemento no solo foram 5,47 vezes superiores no BEB, em relação ao Controle 2, que recebeu fertilização fosfatada (Figura 2A).

Ambos os biochars aumentaram as concentrações de bases trocáveis de Ca e K, enquanto o BEB também aumentou a concentração de Mg trocável no solo (Figura 2B). Em razão do aumento das bases trocáveis, os maiores valores de CTC foram obtidos nos tratamentos de biochar. O BEB aumentou o K 10,71 vezes e o CTC em 1,5 vezes em comparação com o controle 2 e o Mg em 3,39 vezes em relação ao controle 3 (Figura 2B).

Embora o biochar tenha contribuído para o aumento do pH e a disponibilidade de P, K, Ca e Mg no solo, a produção do feijoeiro comum foi menor nos tratamentos com biochar. No entanto é importante salientar que os biochars contribuem, significativamente, para o crescimento das raízes das plantas, o que pode configurar uma vantagem adaptativa, dependendo da espécie vegetal (Figura 2C). Além disso, as diferenças existentes na resposta metabólica das plantas à aplicação de biochar devem ser consideradas, já que elevadas concentrações de biochar são capazes de promover redução no crescimento vegetal por meio de diferentes mecanismos, como deficiência induzida de nutrientes pelo aumento de pH como também pela vulnerabilidade de determinadas plantas pelo próprio aumento do pH (MBAGWU; PICOLLO, 1997).

Tabela 5 – Equações de regressão ajustadas para a matéria seca da parte aérea (MSPA) e raiz (MSRA) após a aplicação de biochar e relação entre matéria seca da parte aérea e raiz (MSPA/MSRA)

Atributo	C1	C2	C3	Biochar de casca de arroz					Biochar de esterco bovino				
				1	2	3	4	Média	1	2	3	4	Média
MSPA				0,53a	0,57	0,76	1,04	0,73B	0,94	1,13	1,30	2,01	1,35A
g/planta	0,42a	3,13b	2,37c	y = 0,38+0,282**x R ² = 0,71					y = 0,51+0,338**x R ² = 0,88				
MSRA				0,82	0,86	0,92	1,74	1,09B	1,01	1,35	1,45	2,06	1,47A
g/planta	0,47a	2,80b	1,91c	y = 0,295+0,172**x R ² = 0,91					y = 0,66+0,325**x R ² = 0,93				
MSPA/MSRA	0,89	1,11	1,24	0,63	0,66	0,83	0,60	0,67	0,93	0,84	0,90	0,98	0,92

C1 (sem calagem e sem fertilização); C2 (adição de carbonato de Ca e Mg, N, P e K); C3 (adição de silicato de Ca e Mg, N e K). As letras minúsculas na linha comparam cada tratamento controle com cada uma das doses de biochar. Sem letra minúscula, indica diferenças significativas entre os tratamentos controle e as doses de biochar. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste Dunnett ($p < 0,05$). Médias das doses de biochar seguidas da mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste F ($p < 0,05$)

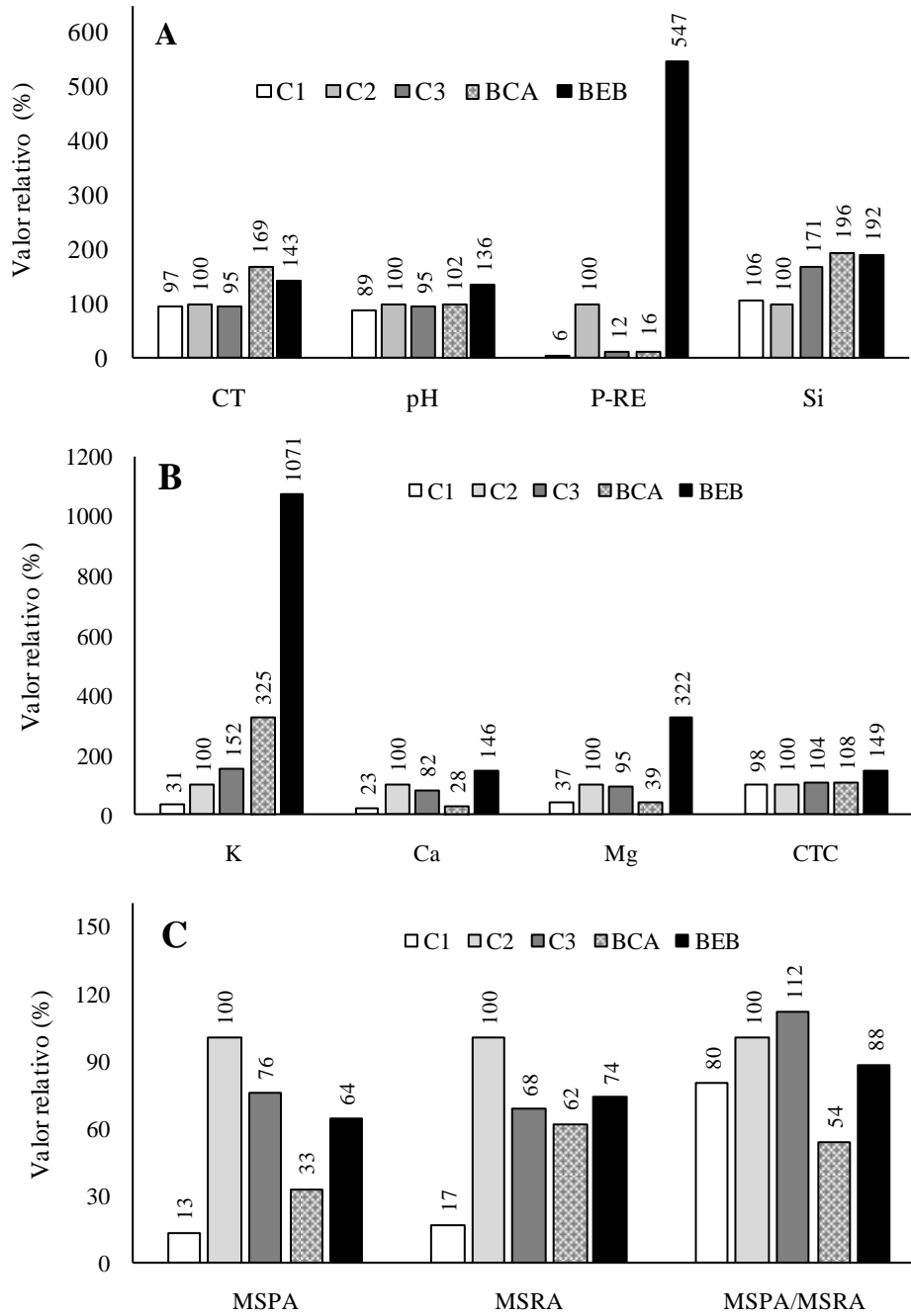


Figura 2 – Valores relativos, calculados a partir do tratamento de referência, Controle 2 (100%), para as variáveis A) carbono total (CT), pH, P (P-RE), Si; B) K, Ca, Mg, CTC; C) matéria seca da parte aérea (MSPA) e raiz (MSRA) e relação (MSPA/MSRA) do feijoeiro

Conclusões

Os biochars corrigiram a acidez do solo, aumentaram a capacidade de troca catiônica, C e nutrientes do solo, especialmente nas doses mais altas de biochar de esterco bovino. A sílica solúvel, presente no biochar, contribuiu para aumentar a disponibilidade de P no solo e não interferiu no método de determinação do P disponível. A produção do feijoeiro aumentou no solo corrigido com biochars, mas foi inferior à obtida no tratamento convencional, em que foram adicionados corretivos de acidez do solo e fertilizantes minerais, indicando que os biochars estudados (de esterco bovino e de casca de arroz) apresentaram capacidade de serem empregados, como corretivos da acidez do solo e como fonte de nutrientes para as plantas, conforme demonstrado nas condições do experimento. Contudo mais estudos são necessários, para a melhor compreensão das interações entre biochar, solo e plantas de interesse agrônômico.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi apoiada pelo Programa Nacional de Cooperação Acadêmica de Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível superior (CAPES/Brasil), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq/Brasil) e pela Fundação do Estado de Minas Gerais para Apoio à Pesquisa (FAPEMIG / Brasil).

Referências

- ABDALA et al. Long-term manure application effects on phosphorus speciation, kinetics and distribution in highly weathered agricultural soils. **Chemosphere**, 119:504-514, 2015.
- ABDELHAFEZ, A. A.; LI, J.; ABBAS, M. H. H. Feasibility of biochar manufactured from organic wastes on the stabilization of heavy metals in a metal smelter contaminated soil. **Chemosphere**, 117:66-71, 2014.
- AHMAD, M. et al. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. **Chemosphere**, 99:19-33, 2014.
- ALBURQUERQUE, J.A. et al. Effects of biochars produced from different feedstocks on soil properties and sunflower growth. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 177(1):16-25, 2014.
- AMENDOLA, C. et al. Short-term effects of biochar on grapevine fine root dynamics and arbuscular mycorrhiza e production. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 239:236-245, 2017.
- ALVAREZ, V. V. H. et al. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 25:27-34, 2000.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Standart test method for chemical analysis of wood charcoal**. D1762-84. West Conshohocken, PA: ASTM International, v. 84, p. 1-2,

2013. Available in:<<https://www.academia.edu/33739293/Standart-Test-Method-for-Chemical-Analysys-of-Wood-Charcoal-1>>. Access in: June, 20,2019.

CABALLERO, E. M.C.; BADEL, D. P.; LUNA, M. P. Organic acids to eliminate interference by phosphorus in the analysis of silicon by molecular absorption. **Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín**, 70(2):8183-8189, 2017.

CARVALHO, R. et al. Interações silício-fósforo em solos cultivados com eucalipto em casa de vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 36(3):557-565, 2001.

CHAN, K.Y. et al. Agronomic values of green waste biochar as a soil amendment. **Australian Journal of Soil Research**, 45(8):629-634, 2007.

CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, 19(2):292-305, 2009.

DOMINGUES, R. R. et al. Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. **PlosOne**, 12(5):1-19, 2017.

DONAGEMMA, G. K. F. et al. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa agropecuária brasileira**, 51(9):1003-1020, 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Brasília, DF: Embrapa Produção de Informação, 2018.356p.

GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. **Biology and Fertility of Soils**. 35(4):219-230, 2002.

GWENZI, W. et al. Biochar production and applications in sub-Sahara Africa: Opportunities, constraints, risks and uncertainties. **Journal of Environmental Management**, 150:250-261, 2015.

GWENZI, W. et al. Comparative short-term effects of sewage sludge and its biochar on soil properties, maize growth and uptake of nutrients on a tropical clay soil in Zimbabwe. **Journal of Integrative Agriculture**, 15(6):1395-1406, 2016.

HAIDER, G. et al. Biochar but not humic acid product amendment affected maize yields via improving plant-soil moisture relations. **Plant and Soil**, 395 (1-2):141-157, 2015.

KOOKANA, R.S. et al. Biochar Application to Soil: agronomic and environmental benefits and unintended consequences. **Advances in Agronomy**, 112:103-143, 2011.

LEHMANN, J.; RONDON, M. Bio-char soil management on highly weathered soils in the tropics. In: UPHOFF, N.T. (Ed). **Biological Approaches to Sustainable Soil Systems**, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 517-530, 2006.

LIU, X. et al. Effect of biochar amendment on soil-silicon availability and rice uptake. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 177(1):91-96, 2014.

MBAGWU, J.S.C.; PICCOLO, A. Effects of humic substances from oxidized coal on soil chemical properties and maize yield, In: BROZD, J.; GONET, S.S.; SENESI, N.; WEBER, J. (eds). **The role of humic substances in the ecosystems and in environmental protection**. IHSS, Polish Society of Humic Substances, Wroclaw, Poland, 921-925, 1997.

MENDÉZ, A. et al. Effect of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil. **Chemosphere**, 89(11):1354-1359, 2012.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2th. London: Academic Press, 889, 1995.

- NOLLA, A. et al. Análise de silício no solo determinada com extratores utilizados na análise de fósforo. **Cultivando o saber**, 3(2):199-206, 2010.
- PAZ-FERREIRO, J. et al. Biochar from biosolids pyrolysis: a review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 15(5):1-16, 2018.
- PETTER, F.A.; MADARI, B.E. Biochar: Agronomic and environmental potential in Brazilian savannah soils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 16(7):761-768, 2012.
- QIAN, L.; CHEN, B.; HU, D. Effective alleviation of aluminum phytotoxicity by manure-derived biochar. **Environmental Science & Technology**, 47(6):2737-2745, 2013.
- QIAN, L. B.; CHEN, B. L. Interactions of aluminum with biochars and oxidized biochars: implications for the biochar aging process. **Journal Agricultural and Food Chemistry**, 62(2):373-380, 2014.
- RAJKOVICH, S. et al. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. **Biology and Fertility of Soils**, 48(3):271-284, 2012.
- RAZAQ, M. et al. Influence of biochar and nitrogen on fine root morphology, physiology, and chemistry of Acer mono. **Scientific Reports**, 7:5367-5377, 2017.
- ROGERI, D. A. et al. Remaining phosphorus content to determine phosphorus availability of the soils in Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 52(12):1203-1214, 2017.
- SANTOS, S. R. et al. Biochar association with phosphate fertilizer and its influence on phosphorus use efficiency by maize. **Ciência e Agrotecnologia**, 43:e025718, 2019.
- SANTOS, L. S.; SILVA, L. S.; GRIEBELER, G. Ácido ascórbico como agente redutor para determinação de fósforo por colorimetria. **Ciência Rural**, 44(6):1015-1018, 2014.
- SILVA, I. C. B. et al. Growth and production of common bean fertilized with biochar. **Ciência Rural**, 47(11):1-8, 2017.
- SONG, L. et al. The molecular mechanism of ethylene-mediated root hair development Induced by phosphate starvation. **PLoS Genetics**, 12:e1006194, 2016.
- SPOKAS, K. A.; BAKER, J. M.; REICOSKY, D. C. Ethylene: potential key for biochar amendment impacts. **Plant Soil**, 333(1-2):443-452, 2010.
- STEENARI, B. M.; KARLSSON, L. G.; LINDQVIST, O. Evaluation of the leaching characteristics of wood ash and the influence of ash agglomeration. **Biomass and Bioenergy**, 16(2):119-136, 1999.
- TANG, J. et al. Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, 116(6):653-659, 2013.
- TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de solos, 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5).
- TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3.ed. Brasília: Embrapa. Informação Tecnológica, Brasília: Embrapa, 2017. 573p.
- USEPA 3051- **Method 3050B: acid digestion of sediments, sludges, and soils**. Revision 2. Washington: Environmental Protection Agency, 1996. 12p. Available in: <<https://www.epa.gov/sites/productin/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>>Access in: June, 20, 2019.
- UZOMA, K. C. et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. **Soil Use and Management**, 27(2):205-212, 2011.

WAQAS, M. et al. The effects of sewage sludge and sewage sludge biochar on PAHs and potentially toxic element bioaccumulation in *Cucumis Sativa* L. **Chemosphere**, 105:53-61, 2014.

WANG, Y.; XIAO, X.; CHEN, B. Biochar impacts on soil silicon dissolution kinetics and their interaction mechanisms. **Scientific Reports**, 8(1):1-11, 2018.

YUAN, J. H.; XU, R.K. Effects of biochars generated from crop residues on chemical properties of acid soils from tropical and subtropical China. **Soil Research**, 50(7):570-578, 2012.

ZELAYA, K. P. S. et al. Biochar in sugar beet production and nutrition. **Ciência Rural**, 50(7):1-9, 2019.

4.2 Artigo 2 – Biochar como corretivo da acidez do solo e fonte de fósforo para plantas de feijoeiro

Elaborado conforme as normas da revista Caatinga.

Resumo: A calagem é uma prática agrícola tradicionalmente utilizada no Brasil para a correção da acidez do solo, fornecimento de Ca e Mg às plantas, além de favorecer o melhor aproveitamento de outros nutrientes como P, K e S. Por possuírem características alcalinizantes, os biochars podem atuar como fontes alternativas promissoras no manejo de solos ácidos. Desse modo, objetivou-se avaliar o efeito de biochars produzidos, a partir do esterco bovino e de casca de arroz, na produção do feijoeiro comum e nas variáveis da fertilidade do solo. O experimento foi realizado em casa de vegetação, em delineamento experimental inteiramente casualizado, esquema fatorial $2 \times 2 \times 2 + 1$, com oito repetições sendo dois tipos de biochar (biochar de esterco bovino leiteiro - BEB e biochar de casca de arroz - BCA), sem e com corretivos da acidez (adição de carbonato de cálcio e carbonato de magnésio, sem e com P (adição de 120 mg dm^{-3} de fósforo na forma de fosfato de amônio) e um tratamento controle (sem adição de biochar, corretivos de acidez e fósforo). Os biochars tiveram efeito de corretivos da acidez do solo e elevaram a capacidade de troca de cátions e os teores de carbono e nutrientes, principalmente o biochar de esterco bovino. A produção do feijoeiro aumentou com as doses de biochar, porém foi menor que a obtida no cultivo convencional, com adição de corretivos da acidez e adubação mineral. Não houve efeito da aplicação de corretivos da acidez, para a matéria seca das raízes e grãos do feijoeiro, exceto para biochar de casca de arroz. Para os teores foliares de N e K, não houve diferenças entre os tratamentos sem e com calagem e entre os biochars. Os biochars, principalmente aquele produzido, a partir de esterco bovino, atuou como corretivo da acidez do solo e fonte de fósforo para as plantas de feijoeiro. As maiores produtividades do feijoeiro foram verificadas nos tratamentos com biochar, uma vez que esses condicionadores neutralizaram a acidez do solo e aumentaram, tanto a disponibilidade de nutrientes no solo quanto os teores de nutrientes nas plantas.

Palavras-chave: Calagem. Biocarvão. Feijão Comum.

BIOCHAR AS A SOIL ACIDITY CORRECTIVE AND PHOSPHORUS SOURCE FOR COMMON BEAN PLANTS

Abstract – The liming is an agricultural practice traditionally used in Brazil that aims among others to correct soil acidity, the supply of Ca and Mg to plants, in addition to favoring the best use of other nutrients such as P, K and S. Because they have alkalizing characteristics, biochars can act as promising alternative sources in the management of acidic soils. Thus, the objective of this work was to evaluate the effect of biochars produced from bovine manure and rice husk on the production of common beans and on soil fertility variables. The experiment was carried out in a greenhouse, in a completely randomized experimental design, factorial scheme $2 \times 2 \times 2 + 1$, with eight replications, with two types of biochars (biochar from bovine dairy manure and biochar from rice husk), without and with acidity correctors (addition of calcium carbonate and magnesium carbonate), without and with phosphorus (addition of $120 \text{ mg of dm}^{-3}$ phosphorus in the form of ammonium phosphate) and a control treatment (without the addition of biochar, acidity correctives and P). The biochars had the effect of

correcting the acidity of the soil and increased the capacity to exchange cations, and the levels of carbon and nutrients, mainly the biochar of cattle manure. Bean production increased with doses of biochar, however it was lower than that obtained in conventional cultivation, with the addition of acidity correctives and mineral fertilizer. There was no effect of applying acidity correctives for dry matter of roots and grains of the bean plant, except for rice husk biochar. For the leaf contents of N and K there was no difference between treatments without and with liming, and between biochars. Biochars, mainly that produced from bovine manure, acted as a corrective agent for soil acidity and a source of phosphorus for bean plants. The higher yields of beans were verified in the treatments with biochar, since these conditioners neutralized the acidity of the soil and increased both the availability of nutrients in the soil and the levels of nutrients in the plants.

Keywords: Liming. Biocarbon. Common beans.

Introdução

Considerado o terceiro maior produtor mundial de alimentos, o Brasil é também um dos maiores importadores de fertilizantes minerais do planeta, uma vez que a produção interna desses insumos tem sido insuficiente para atender a forte demanda. Estima-se que 70% dos fertilizantes utilizados no país sejam oriundos de importações (ANDA, 2019).

Atrelado à expansão das atividades agropecuárias, tem-se a geração de grandes quantidades de resíduos, que, quando não tratados ou manejados corretamente, podem contribuir para o aquecimento global, por meio da emissão de gases do efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), especialmente pela bovinocultura e a rizicultura (NAYAL, *et al.*, 2016). Estima-se que o setor agropecuário seja responsável por 90,6% das emissões de N₂O no Brasil, sobretudo, pela contribuição de parte do N perdido durante a adubação nitrogenada e por dejetos animais (FACHINETTO; BRISOLA, 2018).

Esse cenário traz como desafio o aumento da produção agrícola realizada de forma sustentável, por meio de fontes alternativas capazes de diminuir a dependência internacional de insumos externos, concomitantemente à adequada destinação dos resíduos decorrentes dessas atividades, preservando assim os recursos naturais (KOVACS; SZEMMELVEISZ, 2017).

A conversão de resíduos em biochar apresenta-se como opção atrativa, no manejo de solos agrícolas, já que apresenta potencial para o sequestro de C, por um longo período, além de elevar a fertilidade do solo e potencializar a produtividade das culturas (ABBASI *et al.*, 2015).

Alguns trabalhos têm mostrado o potencial dos biochars na correção dos fatores de acidez do solo e no aumento dos teores de fósforo (SILVA *et al.*, 2017; TORRES *et al.*, 2020). No entanto são escassos os estudos sobre a interação entre biochar, calagem e adubação fosfatada na fertilidade do solo e na produção do feijoeiro.

Neste ensaio, hipotetizamos que os biochars são (i) fontes de fósforo capazes de influenciar a disponibilidade de fósforo no solo, (ii) atua como um corretivo da acidez do solo, melhorando suas propriedades químicas e (iii) contribui para aumentar os teores de macro e micronutrientes foliares e a

produção da matéria seca e grãos do feijoeiro. Assim, os objetivos deste estudo foram avaliar o efeito de biochars produzidos, a partir do esterco bovino e de casca de arroz, na produção do feijoeiro comum e nas variáveis da fertilidade do solo.

Material e Métodos

O estudo foi realizado em casa de vegetação do Instituto de Ciências Agrárias (ICA) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), em delineamento experimental inteiramente casualizado, esquema fatorial $2 \times 2 \times 2 + 1$, com oito repetições. Os tratamentos foram dois tipos de biochar (biochar de esterco bovino leiteiro e biochar de casca de arroz), sem e com corretivos da acidez (adição de carbonato de cálcio e carbonato de magnésio (P.A), na proporção de Ca:Mg 4:1, de modo a elevar a saturação por bases do solo à 60%), sem e com P (adição de 120 mg dm^{-3} de fósforo na forma de fosfato de amônio) e um tratamento controle (sem adição de biochar, corretivos da acidez e P). Nos tratamentos nos quais não foi aplicado o fosfato de amônio adicionaram-se 162 mg dm^{-3} de N, na forma de ureia.

Utilizou-se a camada superficial de 0 a 20 cm de profundidade de um Latossolo Vermelho Amarelo sob vegetação de Cerrado *sensu stricto*. As propriedades físicas e químicas do solo, determinadas de acordo com Teixeira *et al.* (2017), foram: textura de camada superficial classificada como arenosa (areia = 780 g kg^{-1} ; silte = 100 g kg^{-1} ; argila = 120 g kg^{-1}); pH (H_2O) = 5,0; P disponível (método resina) = $1,8 \text{ mg dm}^{-3}$; K = 17 mg dm^{-3} ; Ca = $0,25 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Mg = $0,12 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Al = $0,42 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; saturação por bases = 12,7%; capacidade de troca catiônica = $3,25 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e C orgânico do solo = $10,6 \text{ g kg}^{-1}$. O P remanescente, 28 mg L^{-1} , foi determinado de acordo com Alvarez *et al.* (2000).

O solo e os respectivos tratamentos foram acondicionados em vasos de três litros e incubados por 30 dias com a umidade mantida próxima à capacidade de campo. As quantidades de cada biochar foram de 4% (m/v) da quantidade de solo e corresponderam a 40 gramas de biochar por dm^3 de solo.

Após o período de incubação o solo de cada vaso foi homogeneizado e retirada uma amostra para a análise química. Em todos os tratamentos, aplicou-se uma adubação com 100 mg dm^{-3} de K e 36 mg dm^{-3} de N na forma de nitrato de potássio. Os solos foram retornados aos vasos e semearam-se quatro sementes de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) do grupo comercial carioca, hábito de crescimento indeterminado do tipo II, tutoradas verticalmente com a utilização de estacas (Figura 1B). Aos sete dias após a semeadura, ocorreu o desbaste, deixando-se apenas duas plantas por vaso. O feijoeiro foi cultivado até a produção de grãos (80 dias) mantendo-se a umidade próxima à capacidade de campo (Figura 1).



Figura 1 – Esquema representativo A) vaso contendo solo e tratamentos antes do período de incubação; B) experimento estabelecido aos 80 dias após a semeadura

Fonte: Do autor, 2020.

Durante o período de cultivo, foram realizadas três adubações de cobertura aos 15, 25 e 35 dias da semeadura, com 45 mg dm^{-3} de N na forma de ureia.

Ao final do período experimental, as plantas foram colhidas, separadas em parte aérea (folhas, caules e vagens), raízes e grãos. Em seguida, foram secas em estufa de circulação forçada de ar a $65\text{--}70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ até massa constante para a obtenção da matéria seca da parte aérea, das raízes e de grãos.

Nas amostras de solo de cada vaso, coletadas após 30 dias de incubação, determinaram-se o C total (CT) por incineração; N total; pH em água; P extraído por Mehlich 1; Al (acidez trocável) e; Ca, Mg e K trocáveis, conforme Teixeira *et al.* (2017). A partir dos resultados, foram calculadas a capacidade de troca de cátions e saturação por bases das amostras de solo.

O esterco bovino utilizado como matéria-prima para o biochar foi coletado numa área de alimentação de vacas leiteiras em lactação do ICA/UFMG. A partir do esterco fresco, foram confeccionadas manualmente esferas de aproximadamente 4 cm de diâmetro, que foram secas em estufas a $103 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por um período de 48 horas para a completa desidratação. Para a produção do biochar, as esferas secas foram acondicionadas em um recipiente de aço hermeticamente fechado em uma mufla industrial. A temperatura de pirólise foi de $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$, com o tempo de residência de 30 minutos e taxa de aquecimento de $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por minuto.

Para a obtenção do biochar de casca de arroz (cuja matéria-prima foi adquirida em uma empresa de beneficiamento no município de Montes Claros - MG), adotaram-se os mesmos procedimentos descritos para as esferas secas de esterco bovino. Tanto o biochar de esterco bovino quanto de casca

de arroz foi triturado mecanicamente e passado em peneira de 0,25mm de malha para caracterização química e aplicação ao solo.

Os biochars de esterco bovino e de cascas de arroz foram caracterizados quanto ao pH, densidade e condutividade elétrica, conforme Rajkovich *et al.* (2012). As cinzas foram determinadas, de acordo com o procedimento descrito em ASTM D1762-84, os teores de C e N foram determinados por analisador elementar e os nutrientes e elementos traços determinados por ICP-MS/MS, conforme método USEPA 3051. A caracterização dos biochars e as quantidades de nutrientes e elementos traços adicionados ao solo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização dos biochars de casca de arroz (BCA) e de esterco bovino (BEB) e as quantidades de nutrientes e elementos-traço adicionados ao solo (4%) pelos respectivos biochars. Média (n=4)

Atributo	Caracterização dos biochars		Quantidades de nutrientes e elementos traços	
	BCA	BEB	BCA	BEB
pH	7,3	9,8	-	-
Condutividade elétrica (μScm^{-1})	178	411	-	-
Densidade (g cm^{-3})	0,56	0,54	-	-
Cinzas (%)	24,5	36,2	-	-
Compostos voláteis (%)	65,4	43,5	-	-
Carbono fixo (%)	6,2	12,7	-	-
Biochar (g dm^{-3})	-	-	40	40
Carbono total (g kg^{-1})	91,84	167,9	6,56	12,44
Nitrogênio total (g kg^{-1})	1,96	6,43	0,14	0,48
P (g kg^{-1})	14,17	32,67	1,01	2,42
K (g kg^{-1})	1,90	5,40	0,14	0,40
Ca (g kg^{-1})	12,10	19,33	0,86	1,43
Mg (g kg^{-1})	18,14	23,22	1,30	1,72
Na (g kg^{-1})	<0,01	1,08	<0,01	0,08
S (g kg^{-1})	0,32	0,70	0,02	0,05
Fe (mg kg^{-1})	7,22	375,3	0,52	27,8
Zn (mg kg^{-1})	21,50	100,4	1,54	7,44
Mn (mg kg^{-1})	44,91	82,08	3,21	6,08
Cu (mg kg^{-1})	9,63	15,28	0,69	1,13
B (mg kg^{-1})	2,24	6,64	0,16	0,49

Os dados foram submetidos à análise de variância. Quando significativo, o tratamento testemunha foi comparado individualmente com cada um dos demais tratamentos pelo teste Dunnett a ($p < 0,05$). Os biochars foram comparados entre si pelo teste F ($p < 0,05$), assim como os tratamentos

sem e com corretivos da acidez e sem e com adição de fósforo. Para as análises estatísticas, utilizou-se o *software* R.

Resultados e Discussão

Os teores de C e N total do solo foram menores no tratamento controle (10,3 e 2,3 g kg⁻¹, respectivamente) em relação aos demais tratamentos (Tabela 2). Esses resultados são explicados pela adição dos biochars, uma vez que esses compostos são fontes de C e N. Tanto para o C quanto para o N não houve efeito significativo da adição de corretivos da acidez e de P (Tabela 3). Por outro lado, os valores de C e N foram significativamente maiores nos tratamentos com adição de BEB em relação aos demais tratamentos. Os biochars são materiais ricos em formas mais estáveis de C que permitem maior acúmulo desse elemento no solo ao longo do tempo (GWENZI *et al.*, 2016). Além de serem fontes de N, a incorporação de biochar ao solo pode diminuir as perdas desse elemento por volatilização e lixiviação (LIU *et al.*, 2019).

Os valores de pH do solo, no tratamento controle, foram semelhantes àqueles dos tratamentos com BCA sem calagem, independentemente da adição de P 5,4 e 5,8 respectivamente. (Tabela 2). Nos demais tratamentos, os valores de pH foram maiores que o da testemunha. Os maiores valores de pH nos tratamentos com biochars independentemente da adição de corretivo da acidez, devem-se à presença de bases resultantes do processo de pirólise (STEENARI; KARLSSON; LINDQVIST, 1999; GLASER; LEHMANN; ZECH, 2002; SILVA *et al.*, 2017). Essas bases, presentes nas cinzas de biochar, são capazes de diminuir a acidez trocável do solo pela elevação do pH, devido à presença de sais inorgânicos como carbonatos de Ca e K, além de elevarem a proporção de bases trocáveis (DOMINGUES *et al.*, 2017).

Por outro lado, para o BEB, independentemente da calagem e da aplicação de P, os valores de pH foram maiores que no tratamento controle 8,9 e 5,4, respectivamente (Tabela 2). É provável que a composição e o maior teor de cinzas no BEB (Tabela 1) tenham contribuído para a correção da acidez do solo e, conseqüentemente elevação dos valores de pH do solo.

O tratamento controle apresentou maior valor de Al (acidez trocável) = 4,01 mmolc dm⁻³ em relação aos demais (Tabela 2). Com a adição de BCA e calagem e nos tratamentos com BEB, os valores de Al foram iguais a zero, independentemente da adição de P (Tabela 2). Esses resultados indicam os efeitos positivos da calagem e dos biochars na correção dos fatores de acidez do solo. Com o aumento do pH do solo pelos biochars, formas de Al trocáveis são precipitadas para Al(OH)₃ e, posteriormente, podem ser adsorvidas por grupos funcionais, presentes na superfície de biochar, durante a sua oxidação gradativa (QIAN; CHEN; HU, 2013; TANG *et al.*, 2013).

Tabela 2 – Valores de carbono total (CT), nitrogênio total (NT), pH e alumínio (Al) do solo com e sem fósforo (P), com (CC) e sem calagem (SC), após aplicação de BCA (biochar de casca de arroz) e BEB (biochar de esterco bovino)

Tratamento		CT	NT	pH	Al	
		----g kg ⁻¹ ----			----mmolc dm ⁻³ ----	
Controle		10,3	2,3	5,4	4,01	
BCA	SC	Sem P	17,4a*	3,5a*	5,8a	1,02a*
		Com P	17,28a*	3,2a*	5,8a	1,04a*
	CC	Sem P	16,8a*	3,3a*	8,7b*	0
		Com P	16,9a*	3,2a*	8,9b*	0
BEB	SC	Sem P	17,3a*	7,1a*	8,9b*	0
		Com P	16,5a*	7,5a*	8,9b*	0
	CC	Sem P	16,5a*	7,3a*	9,3b*	0
		Com P	16,3a*	7,2a*	8,7b*	0

Médias com * diferem do tratamento controle (sem adição de biochar, corretivos da acidez e fósforo) pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$). Letras minúsculas nas colunas comparam os tratamentos sem e com fósforo, dentro dos tratamentos sem e com calagem pelo teste F.

Tabela 3 – Valores de carbono total (CT), nitrogênio total (NT), pH e alumínio (Al) do solo com (CC) e sem calagem (SC), após aplicação de BCA (biochar de casca de arroz) e BEB (biochar de esterco bovino)

Tratamento		CT	NT	pH	Al
		---- g kg ⁻¹ ----			----cmolc dm ⁻³ ----
BCA	SC	17,3a	3,4a	5,8b	1,03
	CC	16,9a	3,3a	8,8a	0
	Média	17,1A	3,3B	7,3B	0,51
BEB	SC	16,9a	7,3a	8,9a	0
	CC	16,6a	7,3a	9,0a	0
	Média	16,8A	7,3A	9,0B	0

Letras minúsculas comparam as médias dos tratamentos sem e com calagem, dentro de cada biochar pelo teste F. Letras maiúsculas comparam as médias dos biochars pelo teste F.

O teor de P disponível do solo, extraído pela solução de Mehlich 1, obtido no tratamento controle (1,89 mg dm⁻³), foi inferior aos dos demais (Tabela 4). Para o BCA, independentemente da aplicação de corretivo da acidez e sem calagem, os maiores teores de P foram obtidos com adição desse

elemento ao solo (18,5 e 19,5 mg dm⁻³). Para o BEB com calagem, não houve diferenças entre os teores de P sem e com adição desse elemento (Tabela 4).

Os teores de Ca e Mg, no tratamento controle, foram semelhantes aos obtidos no tratamento com BCA sem calagem e menores que nos demais tratamentos (Tabela 4). Nos tratamentos com biochars, independentemente da calagem, não houve efeito da adição de P nos teores de Ca e Mg (Tabela 4). A capacidade de troca de cátions (CTC), no tratamento controle, foi menor que nos tratamentos com BCA com calagem e P e, nos tratamentos com BEB, independentemente de P (Tabela 4). Para a saturação por bases (V), que expressa a percentagem de bases trocáveis (Ca, Mg e K) na CTC do solo, o valor obtido, no tratamento controle, foi inferior aos demais tratamentos e não houve efeito do P na saturação por bases (Tabela 4).

Tabela 4 – Valores de fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V) do solo com (CC) e sem calagem (SC), com e sem P após aplicação de BCA (biochar de casca de arroz) e BEB (biochar de esterco bovino)

Tratamento		P mg dm ⁻³	Ca -----mmolc dm ⁻³	Mg -----mmolc dm ⁻³	K -----mmolc dm ⁻³	CTC -----	V ----%-	
Controle		1,89	4,4	2,0	0,38	28,8	23,6	
BCA	SC	Sem P	3,89a*	5,2a	2,6a	0,41a	24,8a	33,1a*
		Com P	19,5b*	5,0a	2,0a	0,51 ^a	26,1a	28,8a*
	CC	Sem P	3,72a*	15,0a*	8,0a*	0,41a	33,8a	69,2a*
		Com P	18,5b*	16,0a*	10,0a*	0,41 ^a	37,1a*	71,2a*
BEB	SC	Sem P	78,0a*	20,0a*	9,0a*	1,33a*	36,4a*	83,3a*
		Com P	90,0b*	20,0a*	11,0a*	1,46a*	39,0a*	83,3a*
	CC	Sem P	86,0a*	22,0a*	12,6b*	1,33a*	41,5a*	86,5a*
		Com P	92,0a*	25,0a*	16,6a*	1,23a*	49,3a*	86,8a*

Médias com * diferem do tratamento controle (sem adição de biochar, corretivos da acidez e fósforo) pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$). Letras minúsculas nas colunas comparam os tratamentos sem e com P, dentro dos tratamentos sem e com calagem pelo teste F.

Para os dois biochars estudados, não houve diferenças entre os tratamentos sem e com calagem, para os teores de P, sendo 11,69 e 11,11 mg dm⁻³ para BCA; 84,00 e 89,00 mg dm⁻³ para BEB, respectivamente, (Tabela 5). Dessa forma, os valores atingidos com biochar foram superiores aos níveis de P no solo considerados como adequados (18,1 a 25,0 mg/dm⁻³) conforme Sousa e Lobato (2004). Entretanto o uso de biochar como fonte de P pode ser uma estratégia benéfica, principalmente em solos tropicais caracterizados por sua baixa fertilidade natural, onde a produtividade das plantas é comumente limitada pelo P, em função de sua baixa mobilidade no solo pelas reações de fixação nas partículas da fração argila (MACHADO; SOUZA, 2012).

Além do BEB possuir teores de P mais elevados que o BCA (Tabela 1), pode ter contribuído mais efetivamente, para bloquear os sítios de adsorção de P das argilas, por meio da adição de

ligantes orgânicos e aumento do pH do solo (YUAN; XU, 2012; ABDALA *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2017). Deve-se considerar ainda a presença de sílica solúvel nas cinzas dos biochars. A sílica pode bloquear os sítios de adsorção de P das argilas (LIU *et al.*, 2014; SANDIM *et al.*, 2014), evitando a fixação dos íons fosfatos pelo solo.

Independentemente da aplicação de P, os teores de Ca e Mg, nos tratamentos com BCA e de Mg, nos tratamentos com BEB, foram maiores nos tratamentos com adição de calagem (Tabela 5). Nos tratamentos com BCA, independentemente da calagem e da adubação com P, os teores de Ca e Mg foram menores que nos tratamentos com BEB (Tabela 5). Neste estudo, observa-se que, além do corretivo da acidez do solo, o BCA é uma fonte de Ca e Mg a ser considerada nas adubações.

Em relação ao K trocável, somente os teores obtidos nos tratamentos com BEB foram superiores ao do tratamento controle, independentemente da calagem e da adição de P (Tabela 4). Não houve efeito da calagem sobre o K (Tabela 5), sendo os maiores valores desse elemento encontrados nos tratamentos com adição de BEB (Tabela 5).

Não houve efeito da aplicação de fósforo na CTC do solo. Houve efeito da calagem na CTC, nos tratamentos com BCA, enquanto, para os tratamentos com BEB, a calagem não influenciou a CTC do solo (Tabela 5). Nos tratamentos com BEB, os valores de CTC foram maiores que nos tratamentos com BCA (Tabela 5).

Além de fonte de bases trocáveis (Ca, Mg e K), os biochars, pela neutralização da acidez do solo, alteram a densidade de cargas negativas dependentes do pH, e a contínua oxidação da superfície de suas partículas aumenta continuamente a CTC com o tempo (CHENG; LEHMANN; ENGELHARD, 2008). O interesse pelos biochars surgiu justamente pelos seus efeitos na CTC do solo e na disponibilidade de nutrientes observados nas chamadas “Terras Pretas de Índio” da região amazônica (THOMAS *et al.*, 2015; AQUINO *et al.*, 2016; KERN *et al.*, 2017). As “Terras Pretas de Índio” foram formadas, ao longo dos anos, em áreas de ocupações humanas pré-históricas pelo acúmulo de C pirogênico no solo (KERN *et al.*, 2017).

Para os tratamentos com BCA os valores de saturação por bases foram maiores nos tratamentos com calagem, enquanto, para o BEB, não houve efeito da calagem (Tabela 5). Independentemente da calagem e da aplicação de P, os maiores valores de saturação por bases foram obtidos nos tratamentos com BEB ($V\%=83,3$ e $86,7$) (Tabela 5).

De acordo com os resultados obtidos neste estudo e de outros autores Yuan e Xu (2012); Domingues *et al.* (2017), os biochars, por elevarem o pH, as bases trocáveis e a CTC, podem ser considerados corretivos da acidez do solo.

Tabela 5 – Valores de fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V) do solo com (CC) e sem calagem (SC), após aplicação de BCA (biochar de casca de arroz) e BEB (biochar de esterco bovino)

Tratamento		P	Ca	Mg	K	CTC	V
		mg dm ⁻³	-----mmolc dm ⁻³ -----				%
BCA	SC	11,69a	5,1b	2,3	0,46a	25,5b	30,9b
	CC	11,11a	15,5a	9,0	0,41a	35,5 ^a	70,2a
	Média	11,40B	10,3B	5,65B	0,44B	30,5B	53,8B
BEB	SC	84,00a	20,0a	10,0b	1,40a	37,7a	83,3a
	CC	89,00a	23,5a	14,6a	1,28a	45,4 ^a	86,7a
	Média	86,50A	21,75A	12,3A	1,34A	41,6 ^a	85,1A

Letras minúsculas comparam as médias dos tratamentos sem e com calagem, dentro de cada biochar pelo teste F. Letras maiúsculas comparam as médias dos biochars pelo teste F.

A matéria seca da parte aérea (MSPA), raízes (MSRA) e grãos (MSGR) foram menores, no tratamento controle, exceto para a MSPA, no tratamento com BCA, sem calagem e sem P (Tabela 6).

A MSPA e MSRA, nos tratamentos com BCA, foram maiores com adição de calagem (8,81 e 3,20 g planta⁻¹, respectivamente, enquanto não houve efeito da calagem para a MSGR (Tabela 7). Com a adição de BEB, a matéria seca da parte aérea foi maior sem calagem (11,38 g planta⁻¹), enquanto, para a MSRA e MSGR, não houve efeito da aplicação de corretivos da acidez (Tabela 7). Nos tratamentos com adição de BEB e corretivo da acidez, o pH do solo foi superior a sete (Tabela 2), o que pode ter prejudicado as plantas de feijoeiro.

Para a matéria seca de cem grãos não houve diferenças entre os tratamentos (Tabela 6 e 7), possivelmente, por ser essa característica dependente da genética das plantas. No presente estudo, pode-se inferir que as limitações nutricionais alteram significativamente a produção de grãos, mas não influenciou significativamente a sua massa. Zilo *et al.* (2011) estudaram 26 genótipos de *Phaseolus vulgaris*, em duas safras em três municípios de Santa Catarina, verificando que a massa de 100 grãos foi o caráter mais estável, quando comparados aos demais caracteres avaliados, sendo pouco influenciado pelos genótipos e ambiente de cultivo.

Tabela 6 – Matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca das raízes (MSRA), matéria seca de grãos (MSGR), matéria seca de cem grãos (MSCG), com e sem fósforo (P), com (CC) e sem calagem (SC), após aplicação de BCA (biochar de casca de arroz) e BEB (biochar de esterco bovino)

Tratamento		MSPA	MSRA	MSGR	MSCG	
		----- g planta ⁻¹ -----			g	
Controle		5,83	1,04	17,32	19,77	
BCA	Sem P	6,21b	2,34b*	32,49a*	16,23a	
	SC	Com P	7,85a*	2,89a*	33,84a*	18,77a
	Sem P	7,35b*	2,75b*	27,86b*	17,84a	
	CC	Com P	10,26a*	3,65a*	38,94a*	21,23a
BEB	Sem P	10,43a*	3,01b*	40,34a*	19,77a	
	SC	Com P	12,32a*	3,87a*	43,65a*	20,42a
	Sem P	8,76b*	2,83b*	38,54a*	17,84a	
	CC	Com P	10,43a*	3,98a*	37,02a*	18,23a

Médias com * diferem do tratamento controle (sem adição de biochar, corretivos da acidez e fósforo) pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$). Letras minúsculas nas colunas comparam os tratamentos sem e com fósforo, dentro dos tratamentos sem e com calagem pelo teste F.

Tabela 7 – Matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca das raízes (MSRA), matéria seca de grãos (MSGR), matéria seca de cem grãos (MSCG), com (CC) e sem calagem (SC), após aplicação de BCA (biochar de casca de arroz) e BEB (biochar de esterco bovino)

Tratamento		MSPA	MSRA	MSGR	MSCG
		----- g planta ⁻¹ -----			
BCA	SC	7,03b	2,62b	33,17a	17,50a
	CC	8,81a	3,20a	33,40a	15,53a
	Média	7,92B	2,91A	33,28A	18,51A
BEB	SC	11,38a	3,44a	42,00a	20,10a
	CC	9,60b	3,41a	37,78a	18,04a
	Média	10,49A	3,42A	39,89A	19,07A

Letras minúsculas comparam as médias dos tratamentos sem e com calagem, dentro de cada biochar pelo teste F. Letras maiúsculas comparam as médias dos biochars pelo teste F.

Os teores de macronutrientes nas folhas de feijoeiro, no tratamento controle, foram, de modo geral, inferiores aos obtidos nos demais tratamentos, exceto para N ($36,4 \text{ g kg}^{-1}$), nos tratamentos com BCA e, para P ($3,1 \text{ g kg}^{-1}$), K ($32,6 \text{ g kg}^{-1}$) e Ca ($20,8 \text{ g kg}^{-1}$), nos tratamentos com BCA sem calagem (Tabela 8). Para os macronutrientes N, K, Ca, Mg e S, exceto para o Mg com BCA e sem calagem, não houve diferenças entre os tratamentos sem e com P. Para o P e Mg com BCA e com calagem, os teores foliares foram maiores nos tratamentos que receberam adubação com P $6,9 \text{ g kg}^{-1}$ e $6,1 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente (Tabela 8). Maiores quantidades de K Ca e Mg (aumentos de 20, 80 e 64 %) também

foram observados por Abriz e Torabian, (2018), nos teores foliares do feijoeiro, após a aplicação de biochar. Da mesma forma, Yao *et al.*(2019), ao estudarem o efeito da interação da aplicação de doses de calcário (0; 0,75 e 1,5 g kg⁻¹) e três taxas de biochar (0; 5 e 10 g kg⁻¹), no cultivo de feijão-arroz (*Phaseolus calcaltus*), constataram que a aplicação de cal e biochar contribuíram significativamente a absorção de N,P,K. Corroborando com os resultados encontrados por Lima *et al.* (2016), ao avaliarem o efeito da aplicação de biochar e N, no desenvolvimento de mudas de angico (*Anadenanthera colubrina*), constataram melhoria no aumento foliar de Mg de 55% (2,26 g kg⁻¹) com aplicação de doses de biochar acima de 30% em comparação ao tratamento testemunha.

Aumentos na concentração foliar de nutrientes das plantas pela aplicação biochar podem ser atribuídos ao reflexo da contribuição de biochar, na melhoria nas propriedades do solo, como neutralização do alumínio tóxico, melhorias na retenção de nutrientes no complexo de cargas trocáveis do solo e na absorção e disponibilidade de macro e micronutrientes para as plantas (CARVALHO *et al.*, 2014; DING *et al.*, 2016).

Tabela 8 – Teores foliares de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S), em feijoeiro com e sem fósforo (P), com (CC) e sem calagem (SC), após a aplicação de BCA (biochar de casca de arroz) e BEB (biochar de esterco bovino)

Tratamento		N	P	K	Ca	Mg	S	
		-----g k g ⁻¹ -----						
Controle		32,6	2,8	31,4	19,7	1,5	1,1	
BCA	SC	Sem P	32,4a	3,1b	32,6a	20,8a	2,1b*	1,6a*
		Com P	34,6a	5,6a*	34,6a*	20,6a	2,8a*	1,7a*
	CC	Sem P	35,7a	4,2b*	35,6a*	34,7a*	5,7a*	1,8a*
		Com P	36,4a	6,9a*	35,9a*	35,8a*	6,1a*	1,8a*
BEB	SC	Sem P	42,4a*	7,8a*	40,3a*	25,6a*	3,6a*	2,3a*
		Com P	41,2a*	6,9a*	40,8a*	26,7a*	4,3a*	2,4a*
	CC	Sem P	37,5a	5,1b*	40,4a*	38,9a*	6,7a*	2,2a*
		Com P	37,0a	6,7a*	40,2a*	37,5a*	7,2a*	2,1a*

Médias com * diferem do tratamento controle (sem adição de biochar, corretivos da acidez e fósforo) pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$). Letras minúsculas nas colunas comparam os tratamentos sem e com fósforo, dentro dos tratamentos sem e com calagem pelo teste F.

Para os teores foliares de N e K não houve diferenças entre os tratamentos sem e com calagem e entre os biochars (Tabela 9). Provavelmente esses resultados se devem ao fato de que todos os tratamentos receberam adubação com esses elementos. Os teores foliares de P, nos tratamentos com BEB, independentemente da aplicação de P, foram maiores que no BCA (Tabela 9). Os maiores teores de P das plantas de feijoeiro, nos tratamentos com BEB, deve-se à maior disponibilidade desse nutriente no solo, como discutido anteriormente.

Para o Ca e Mg nas plantas de feijoeiro, os maiores valores foram observados nos tratamentos com calagem (Tabela 8). Para o Mg, independentemente da calagem, os maiores teores foram obtidos

com BEB. Os teores foliares de S não foram influenciados pela calagem, sendo os maiores valores obtidos com a aplicação de BEB (Tabela 8).

Tabela 9 – Teores foliares de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S), em feijoeiro com (CC) e sem calagem (SC), após a aplicação de BCA (biochar de casca de arroz) e BEB (biochar de esterco bovino)

Tratamento		N	P	K	Ca	Mg	S
		-----g kg ⁻¹ -----					
BCA	SC	33,5a	4,4b	33,6a	20,7b	2,5b	1,7a
	CC	36,1a	5,6a	35,8a	35,3a	5,9a	1,8a
	Média	34,8A	5,0B	34,7A	28,0A	4,2B	1,7B
BEB	SC	41,8a	7,4a	40,6A	26,2b	4,0b	2,4a
	CC	37,3a	5,9b	40,3A	38,2a	7,0a	2,2a
	Média	39,5A	6,6A	40,4A	32,2A	5,5A	2,3A

Letras minúsculas comparam as médias dos tratamentos sem e com calagem, dentro de cada biochar pelo teste F. Letras maiúsculas comparam as médias dos biochars pelo teste F

Para os micronutrientes, somente os teores foliares obtidos, nos tratamentos com BEB, foram maiores que aqueles verificados, no tratamento controle, exceto para o zinco em que os teores obtidos, nos tratamentos com BCA e calagem, também, foram maiores que aquele encontrado no controle (Tabela 10). A adição de P não influenciou os teores foliares de micronutrientes, independentemente do tipo de biochar e da adição de corretivos da acidez do solo (Tabela 10).

Tabela 10 – Teores foliares de micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn), em feijoeiro com e sem fósforo (P), com (CC) e sem calagem (SC), após a aplicação de BCA (biochar de casca de arroz) e BEB (biochar de esterco bovino)

Tratamento		B	Cu	Fe	Mn	Zn	
		-----mg kg ⁻¹ -----					
Controle		83	6,4	321	195	32	
BCA	SC	Sem P	80a	7,2a	322a	201a	37a
		Com P	84a	7,3a	318a	204a	40a*
	CC	Sem P	93a	6,9a	332a	200a	43a*
		Com P	88a	7,0a	325a	199a	45a*
BEB	SC	Sem P	125a*	7,2a	387a*	238a	44a*
		Com P	130a*	6,5a	376a*	215a	51a*
	CC	Sem P	128a*	5,8a	354a	213a	46a*
		Com P	128a*	5,6a	341a	209a	42a*

Médias com * diferem do tratamento controle (sem adição de biochar, corretivos da acidez e fósforo) pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$). Letras minúsculas nas colunas comparam os tratamentos sem e com fósforo, dentro dos tratamentos sem e com calagem pelo teste F.

A adição de corretivos da acidez do solo não influenciou os teores foliares de micronutrientes, exceto para o Cu, cujo teor no tratamento com BEB e com calagem foi menor que no tratamento sem calagem. Independentemente da calagem e da adubação fosfatada, os maiores teores de B foram obtidos com a aplicação de BEB, enquanto, para o Cu, Fe, Mn e Zn, não houve efeito do tipo de biochar (Tabela 11).

Os biochars possuem a capacidade de imobilização de metais, nas cargas elétricas negativas de superfície, reduzindo assim as suas biodisponibilidades. No entanto, no presente estudo, apesar de o BEB apresentar maior CTC, esse biochar atuou como fonte de micronutrientes para as plantas de feijoeiro.

A biodisponibilidade de micronutrientes catiônicos e elementos-traço é influenciada pelos biochars, uma vez que são considerados fortes adsorventes desses elementos pela alta aromaticidade, superfície específica e capacidade de elevar o pH do solo (ALBUQUERQUE *et al.*, 2014; MÉNDEZ *et al.*, 2012). Nesse sentido, os biochars são amplamente utilizados para a remediação de solos contaminados por metais pesados (HE *et al.*, 2019).

Tabela 11 – Teores foliares de micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn), em feijoeiro com (CC) e sem calagem (SC), após a aplicação de BCA (biochar de casca de arroz) e BEB (biochar de esterco bovino)

Tratamento		B	Cu	Fe	Mn	Zn
		-----mg kg ⁻¹ -----				
BCA	SC	82,0a	7,3a	320,0a	202,5a	38,5a
	CC	90,5a	7,0a	328,5a	199,5a	44,0a
	Média	86,3B	7,1A	324,3A	201,0A	41,3A
BEB	SC	127,5a	6,9b	381,5a	226,5a	47,5a
	CC	128,0a	5,7a	347,5a	211,0a	44,0a
	Média	127,8A	6,3A	364,5A	218,8A	45,8A

Letras minúsculas comparam as médias dos tratamentos sem e com calagem, dentro de cada biochar pelo teste F. Letras maiúsculas comparam as médias dos biochars pelo teste F.

Conclusões

Os biochars, principalmente aquele produzido a partir de esterco bovino, atuou como corretivo da acidez do solo e fonte de fósforo para as plantas de feijoeiro.

A maior produção do feijoeiro foi verificada, nos tratamentos com biochar, uma vez que esses condicionadores neutralizaram a acidez do solo e aumentaram tanto a disponibilidade de nutrientes no solo quanto os teores desses elementos nas plantas.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi apoiada pelo Programa Nacional de Cooperação Acadêmica de Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível superior (CAPES/Brasil), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq/Brasil) e pela Fundação do Estado de Minas Gerais para Apoio à Pesquisa (FAPEMIG / Brasil).

Referências

- ABBASI, M. K. et al. Ameliorating effects of biochar derived from poultry manure and white clover residues on soil nutrient status and plant growth promotion-greenhouse experiments. **PloSone**, 10: p-e0131592, 2015.
- ABDALA, D. B. et al. Long-term manure application effects on phosphorus speciation, kinetics and distribution in highly weathered agricultural soils. **Chemosphere**, 119: 504-514, 2015.
- ABRIZ, S.F.; TORABIAN, S. Effect of biochar on growth and ion contents of bean plant under saline condition. **Environmental Science and Pollution Research**, 25(12): 11556-11564, 2018.
- ALBURQUERQUE, J. A. et al. Effects of biochars produced from different feedstocks on soil properties and sunflower growth. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 177: 16-25, 2014.
- ALVAREZ, V. V. H. et al. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 25: 27-34, 2000.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Standart test method for chemical analysis of wood charcoal**. D1762-84. West Conshohocken, PA: ASTM International, v. 84, p. 1-2, 2013. Available in: <<https://www.academia.edu/33739293/Standart-Test-Method-for-Chemical-Analysis-of-Wood-Charcoal-1>>.Acess in: June, 20, 2019.
- ANDA - **Associação Nacional para a difusão de adubos**. Estatísticas, Disponível em: <<http://www.anda.org.br>>. Acesso em: 24 ago. 2019.
- AQUINO R. E. et al. Characteristics of color and iron oxides of clay fraction in Archeological Dark Earth in Apuíregion, southern Amazonas. **Geoderma**. 267: 35-44, 2016.
- CARVALHO, M. T. M. et al. Biochar increases plant-available water in a sandy loam soil under an aerobic rice crop system. **Solid Earth**. 5: 939-952, 2014.
- CHENG, C.H.; LEHMANN, J.; ENGELHARD, M.H. Natural oxidation of black carbon in soils: changes in molecular form and surface charge along a climosequence. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 72: 1598-1610, 2008.
- DING, Y. et al. Biochar to improve soil fertility. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, 36(2):1-18, 2016.
- DOMINGUES, R.R. et al. Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. **PloSone**, 12:1-19, 2017.
- FACHINETTO, J.D. BRISOLA, M.V. Evolução dos estudos sobre a produção de bovinos de corte e a emissão de gases de efeito estufa decorrente dessa atividade na região central do Brasil. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, 45: 180-193, 2018.
- GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. **Biology and fertility of soils**, 35:219-230, 2002.

- GWENZI, W. et al. Comparative short-term effects of sewage sludge and its biochar on soil properties, maize growth and uptake of nutrients on a tropical clay soil in Zimbabwe. **Journal of Integrative Agriculture**, 15:1395-1406, 2016.
- HE, L. et al. Remediation of heavy metal contaminated soils by biochar: Mechanisms, potential risks and applications in China. **Environmental pollution**, 252: 846-855, 2019.
- KERN, D.C. et al. Terraspretas: Approaches to formation processes in a new paradigm. **Geoarchaeology**, 32: 694-706, 2017.
- KOVACS, H. SZEMMELVEISZ, K. Disposal options for polluted plants grown on heavy metal contaminated brownfield lands - A review. **Chemosphere**, 166: 8-20, 2017.
- LIMA, S. L.; MARINON JUNIOR, B. H.; MELO, S. K. D. S.; REIS, S. M.; PETTER, F. A.; VILAR, C. C.; MARIMON, B. S. Biochar no manejo de nitrogênio e fósforo para a produção de mudas de angico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 51(2): 120-131, 2016.
- LIU, Q. et al. Biochar application as a tool to decrease soil nitrogen losses (NH₃ volatilization, N₂O emissions, and N leaching) from croplands: Options and mitigation strength in a global perspective. **Global change biology**, 25: 2077-2093, 2019.
- LIU, X. et al. Effect of biochar amendment on soil-silicon availability and rice uptake. **Journal of plant nutrition and soil science**, 177: 91-96, 2014.
- MACHADO, V.J.; SOUZA, C.H.E. Disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico de liberação lenta . **Bioscience Journal**, 28: 1-7, 2012.
- MÉNDEZ, A. et al. Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil. **Chemosphere**, 89: 1354-1359, 2012.
- NAYAL, F. S. et al. Environmental assessment of energy generation from agricultural and farm waste through anaerobic digestion. **Journal of environmental management**, 184:389-399, 2016.
- QIAN, L.; CHEN, B.; HU, D. et al. Effective alleviation of aluminum phytotoxicity by manure-derived biochar. **Environmental science & technology**, 47: 2737-2745, 2013.
- RAJKOVICH, S. et al. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. **Biology and Fertility of Soils**, 48: 271-284, 2012.
- SANDIM, A.D.S. et al. Phosphorus availability in oxidic soils treated with lime and silicate applications. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38: 1215-1222, 2014.
- SILVA, I.C.B et al. Growth and production of common bean fertilized with biochar. **Ciência rural**, 47: 1-8, 2017.
- SOUSA, D.M.G; LOBATO, E (Ed.).**Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. 416p.
- STEENARI, B.M.; KARLSSON, L.G.; LINDQVIST, O. Evaluation of the leaching characteristics of wood ash and the influence of ash agglomeration. **Biomass and Bioenergy**, 16: 119-136, 1999.
- TANG et al. Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil. **Journal of bioscience and bioengineering**, 116:653-659, 2013.
- TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3.ed. Brasília: Embrapa. Informação Tecnológica, Brasília: Embrapa, 2017.573p.
- THOMAS, E. et al. Uncovering spatial patterns in the natural and human history of Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) across the Amazon Basin.**Journal of Biogeography**,42: 1367-1382, 2015.

TORRES, W.G.A. et al. Phosphorus availability in soil amended with biochar from rice rusk and cattle manure and cultivated with common bean. **Ciência e Agrotecnologia**, 44:.e014620, 2020.

USEPA 3051- **Method 3050B: acid digestion of sediments, sludges, and soils**. Revision 2. Washington: Environmental Protection Agency, 1996. 12p. Available in: <<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>.>Access in: June, 20, 2019.

YAO, L. et al. Responses of *Phaseolus calcaltus* to lime and biochar application in an acid soil. **Peerj**, 7:e6346, 2019.

YUAN, J. H.; XU, R. K. Effects of biochars generated from crop residues on chemical properties of acid soils from tropical and subtropical China. **Soil Research**, 50:570-578, 2012.

ZILIO, M. et al. Contribuição dos componentes de rendimento na produtividade de genótipos crioulos de feijão (*Phaseolusvulgaris* L.). **Revista Ciência Agronômica**, 42: 429-438, 2011.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os biochars corrigiram a acidez do solo, aumentaram a capacidade de troca catiônica, C e nutrientes do solo, especialmente nas doses mais altas de biochar de esterco bovino. A sílica solúvel, presente no biochar, contribuiu para aumentar a disponibilidade de P no solo e não interferiu no método de determinação do P disponível. A produção do feijoeiro aumentou no solo corrigido com biochars, mas foi inferior à obtida no tratamento convencional, em que foram adicionados corretivos de acidez do solo e fertilizantes minerais, indicando que os biochars estudados (de esterco bovino e de casca de arroz) apresentaram capacidade de serem empregados, como corretivos da acidez do solo e como fonte de nutrientes para as plantas, conforme demonstrado nas condições do experimento.

Também pode-se afirmar que os biochars, principalmente aquele produzido a partir de esterco bovino, atuou como corretivo da acidez do solo e fonte de fósforo para as plantas de feijoeiro.

A maior produção do feijoeiro foi verificada, nos tratamentos com biochar, uma vez que esses condicionadores neutralizaram a acidez do solo e aumentaram tanto a disponibilidade de nutrientes no solo quanto os teores desses elementos nas plantas.