

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL**

**José Mendes dos Santos Júnior**

**Pellets de biochar como condicionador de solo na produção e nutrição de  
*Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás**

**Montes Claros  
2022**

**José Mendes dos Santos Júnior**

**Pellets de biochar como condicionador de solo na produção e nutrição de  
*Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás**

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

**Orientador:** Prof. Dr. Luiz Arnaldo Fernandes

**Coorientador:** Prof. Dr. Fernando Colen

Montes Claros  
Fevereiro de 2022

Santos Júnior, José Mendes dos.

S237p  
2022

Pellets de biochar como condicionador de solo na produção e nutrição de urochloa  
brizantha cv. brs paiaguás [manuscrito]/ José Mendes dos Santos Júnior. Montes  
Claros, 2022.

59 f.: il.

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

Orientador: Luiz Arnaldo Fernandes.

Banca examinadora: Luiz Arnaldo Fernandes, Fernando Colen, Rodinei Facco  
Pegoraro, Reges Heinrichs..

Inclui referências: f. 50-59.

1. Pelotas de biochar -- Teses. 2. Pirólise -- Teses. 3. Biomassa vegetal -- Teses.  
4. Pastagens -- Teses. 5. Solos -- Fertilidade -- Teses I. Fernandes, Luiz Arnaldo. II.  
Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 631.4



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

### ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO / TESE

Aos 18 dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e dois, às 8:30 horas, sob a Presidência do Professor Luiz Arnaldo Fernandes, D. Sc. (Orientador – UFMG/ICA) e com a participação dos Professores Fernando Colen, D. Sc. (Coorientador - UFMG/ICA), Rodinei Facco Pegoraro, D. Sc. (UFMG/ICA) e Reges Heinrichs, D. Sc. (Unesp), reuniu-se, por videoconferência, a Banca de Defesa de Dissertação de **JOSÉ MENDES DOS SANTOS JÚNIOR**, aluno do Curso de Mestrado em Produção Vegetal. Após avaliação da defesa de Dissertação do referido aluno, a Banca Examinadora procedeu à publicação do resultado da defesa de Dissertação intitulada: "**Pellets de biochar como condicionador de solo na produção e nutrição de *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás**", 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 Mestrado 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, 18 de fevereiro de 2022.

---

Luiz Arnaldo Fernandes  
Orientador

---

Fernando Colen  
Coorientador

---

Rodinei Facco Pegoraro  
Membro

---

Reges Heinrichs  
Membro



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Arnaldo Fernandes, Servidor(a)**, em 18/02/2022, às 11:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodinei Facco Pegoraro, Professor do Magistério Superior**, em 18/02/2022, às 11:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Colen, Professor do Magistério Superior**, em 18/02/2022, às 11:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Reges Heinrichs, Usuário Externo**, em 18/02/2022, às 11:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador 1264363 e o código CRC ABD94DC3.

*A Deus, pelo cuidado e proteção incessantes;  
e a toda minha família, pelo amor e suporte.*

*Dedico.*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, pois, sem Ele, nada seria possível em minha vida. “Quem mais eu tenho no céu senão a ti? Eu te desejo mais que a qualquer coisa na terra. Minha saúde pode acabar e meu espírito fraquejar, mas Deus continua sendo a força de meu coração; ele é minha possessão para sempre” (Bíblia Sagrada).

Aos meus queridos pais, José e Cleide Mendes e à minha irmã, Carolina, por todo o amor, apoio incansável, incentivo, proteção e ensinamentos constantes.

Aos meus tios, Jair, Ivânia, Maria Zilma, Ademir, Gilda e Anita por toda contribuição e assistência durante o meu período de estudo.

Aos meus avós, Manoel, Arlinda, Pedro (*In memoriam*) e Manoelina (*In memoriam*).

Aos meus primos, Jefferson, Jônatas, Jéssica, Melquisedeque, Melissa e Larissa.

Aos meus queridos companheiros Bruna e Vinícius, pelo amparo amigável.

Ao meu orientador e professor Luiz Arnaldo Fernandes, por todo apoio, ajuda, instrução, colaboração e paciência na realização de todo o experimento, bem como ao meu professor e coorientador Fernando Colen pelos ensinamentos e contribuições.

Aos colegas que desenvolvi durante a pós-graduação.

À Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) – Instituto de Ciências Agrárias (ICA), pela oportunidade oferecida e a todo o corpo docente pelos conhecimentos que me foram transmitidos de forma magistral.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos disponibilizada.

Aos membros da banca, e a todos aqueles que colaboraram de alguma forma para o cumprimento deste maravilhoso sonho.

**MUITO OBRIGADO!**

*“[...] a falta de entendimento e a ausência de rigor autocrítico são os dois sinais mais visíveis de que a condição do tolo não poderia ser outra senão a de um aprisionamento. Afinal, quem não é capaz de ponderar, de inquirir a si mesmo e de corrigir seus equívocos jamais será livre o suficiente para enxergar o mundo à sua volta [...]” (Jonas Madureira, Inteligência Humilhada, 2017).*



## PELLETS DE BIOCHAR COMO CONDICIONADOR DE SOLO NA PRODUÇÃO E NUTRIÇÃO DE UROCHLOA BRIZANTHA CV. BRS PAIAGUÁS

### RESUMO

A utilização de biochars na produção sustentável de alimentos pode ser considerada alternativa de manejo para o condicionamento das propriedades químicas e físicas do solo e aproveitamento de resíduos orgânicos. Todavia o seu emprego na agricultura é ainda controverso, pelas quantidades a serem aplicadas e pelo pequeno tamanho das partículas, que podem causar problemas respiratórios quando inaladas. Tais inconvenientes podem ser amenizados por meio da peletização e enriquecimento do biochar com fertilizantes minerais. Objetivou-se avaliar os efeitos da aplicação de biochar de esterco bovino (BEB) nas propriedades químicas do solo e no crescimento do capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás. O biochar foi produzido a partir da pirólise de esterco bovino a 450 °C. Após a caracterização química e física, realizou-se a peletização do biochar com e sem fertilizante fosfato de potássio (PK), utilizando-se da fécula de mandioca como aglutinante, na proporção de 2:2:1 (biochar:PK:aglutinante) e 4:1 (biochar:aglutinante). As misturas foram introduzidas num molde com orifícios e secas a 65 °C para a formação do pellet. Um experimento, em vasos em casa de vegetação, foi realizado para a avaliação agrônômica do fertilizante organomineral por cinco ciclos de cultivo (cortes) do capim, num arranjo fatorial 2x2x2+1, em delineamento inteiramente casualizado, com cinco repetições. Os tratamentos consistiram no emprego do biochar não peletizado e peletizado, sem e com aplicação de corretivo da acidez do solo, sem e com PK no pellet, além de um tratamento adicional constituído pelo solo natural. Nos tratamentos com PK, foram adicionados 200 mg dm<sup>-3</sup> de P e 250 mg dm<sup>-3</sup> de K. Em cada ciclo, avaliaram-se a biomassa seca de parte aérea (BSPA) e os acúmulos de macro e micronutrientes do capim. Após o período de cultivo, determinou-se a biomassa seca radicular (BSRA), além da análise química do solo. No solo, a aplicação do biochar sem e com peletização, com calagem, independentemente de fertilização, elevaram o pH para valores próximos a 7,0. Os teores mais elevados de Ca e Mg foram obtidos nos tratamentos com calagem, enquanto os maiores teores de P e K foram observados nos tratamentos com biochar peletizado e enriquecido com esses nutrientes. No primeiro ciclo, a BSPA foi 18,28% maior no tratamento com biochar não peletizado e adubação PK. A partir do segundo ciclo, as maiores produções de BSPA foram obtidas nos tratamentos com biochar peletizado e enriquecido com PK. A BSPA no tratamento controle apresentou-se significativamente menor, em relação aos demais tratamentos, em todos os ciclos de cultivo. A BSRA demonstrou-se significativamente menor no tratamento controle quanto aos demais tratamentos. Os maiores acúmulos foliares de macronutrientes foram obtidos nos tratamentos com calagem e adubação PK, enquanto, para os micronutrientes, as maiores médias foram observadas nos tratamentos com aplicação de PK. Portanto, o BEB aumentou a fertilidade do solo e contribuiu para o crescimento de *U. brizantha* cv. BRS Paiaguás, sendo as maiores produções obtidas nos tratamentos com biochar peletizado e enriquecido com PK.

**Palavras-chave:** Peletização de biochar. Pirólise. Fertilizante organomineral. Pastagens.

## BIOCHAR PELLETS AS A SOIL CONDITIONER IN THE PRODUCTION AND NUTRITION OF UROCHLOA BRIZANTHA CV. BRS PAIAGUÁS

### ABSTRACT

The use of biochars in sustainable food production can be considered an alternative of management for conditioning the chemical and physical properties of the soil and the use of organic residues. However its use in agriculture is still controversial, due to the amounts to be applied and because the small size of the particles, which can cause respiratory problems when inhaled. Such inconveniences can be alleviated by means of pelletizing and enriching the biochar with mineral fertilizers. The objective was to evaluate the effects of the application of bovine manure biochar (BEB) on the chemical properties of the soil and on the growth of *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás grass. The biochar was produced from the pyrolysis of bovine manure at 450 °C. After chemical and physical characterization, it was held the biochar pelletizing with and without potassium phosphate (PK) fertilizer, using cassava starch as a binder, in a 2:2:1 ratio (biochar:PK:binder) and 4:1 (biochar:binder). The mixtures were introduced into a mold with holes and dried at 65 °C for pellet formation. An experiment, in pots in a greenhouse, was carried out for the agronomic evaluation of the organomineral fertilizer for five cropping cycles (cuts) of the grass, in a 2x2x2+1 factorial arrangement, in a completely randomized design, with five replications. The treatments consisted of the use of non-pelleted and pelleted biochar, without and with the application of soil acidity corrector, without and with PK in the pellet, in addition to an additional treatment consisting of the natural soil. In the PK treatments, 200 mg dm<sup>-3</sup> of P and 250 mg dm<sup>-3</sup> of K were added. In each cycle, the aerial part dry biomass (BSPA) and the accumulation of macro and micronutrients of the grass were evaluated. After the cultivation period, root dry biomass (BSRA) was determined, in addition to soil chemical analysis. In the soil, the application of biochar without and with pelletizing, with liming, regardless of fertilization, raised the pH to values close to 7.0. The highest levels of Ca and Mg were obtained in treatments with liming, while the highest levels of P and K were observed in treatments with pelleted biochar and enriched with these nutrients. In the first cycle, BSPA was 18,28% higher in the treatment with non-pelleted biochar and PK fertilization. From the second cycle onwards, the highest productions of BSPA were obtained in treatments with pelleted biochar and enriched with PK. The BSPA in the control treatment presented significantly lower, in relation to the other treatments, in all cultivation cycles. BSRA showed significantly lower in the control treatment than in the other treatments. The highest foliar accumulations of macronutrients were obtained in treatments with liming and PK fertilization, while, for micronutrients, the highest averages were observed in treatments with PK application. Therefore, BEB increased soil fertility and contributed to the growth of *U. brizantha* cv. BRS Paiaguás, being the highest productions obtained in treatments with pelleted biochar and enriched with PK.

**Keywords:** Biochar pelletizing. Pyrolysis. Organomineral fertilizer. Pastures.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Representação do capim <i>Urochloa brizantha</i> cv. BRS Paiaguás. (A) Partes da planta, (B) altura de corte ideal e (C) mau manejo.....   | 19 |
| Figura 2 – (A) Confeção de esferas de 4 cm a partir do esterco bovino; (B) Esferas secas e (C) Biochar triturado.....   | 24 |
| Figura 3 – Processo de preparação do fertilizante organomineral peletizado. (A) Mistura para a preparação do biochar peletizado; (B) Molde de polietileno para a incorporação da mistura e (C) Espátula plástica trapezoidal utilizada para a inserção da mistura no molde.....   | 26 |
| Figura 4 – Aplicação dos tratamentos no solo. (A) Tratamento com a calagem, com o biochar não peletizado e com a fertilização com PK e (B) Tratamento sem a calagem, com o biochar peletizado enriquecido com PK.....   | 27 |
| Figura 5 – Representação dos tratamentos experimentais. (A) solo natural; (B) biochar não peletizado, sem a calagem e sem a fertilização; (C) biochar não peletizado, sem a calagem e com a fertilização; (D) biochar não peletizado, com a calagem e sem a fertilização; (E) biochar não peletizado, com a calagem e com a fertilização; (F) biochar peletizado, sem a calagem e sem a fertilização; (G) biochar peletizado, sem a calagem e com a fertilização; (H) biochar peletizado, com a calagem e sem a fertilização; (I) biochar peletizado, com a calagem e com a fertilização..... | 28 |
| Figura 6 – Altura de corte do capim <i>Urochloa brizantha</i> cv. BRS Paiaguás. (A) Altura de entrada: 40 cm e (B) altura de saída: 20 cm.....  | 29 |
| Figura 7 – Representação do contato da raiz do capim <i>Urochloa brizantha</i> cv. BRS Paiaguás com o biochar peletizado.....   | 44 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Estruturação experimental.....   | 27 |
| Tabela 2 – Caracterização do Biochar de Esterco Bovino (BEB).....   | 33 |
| Tabela 3 – pH, fósforo Mehlich (P), potássio trocável (K), cálcio trocável (Ca) e magnésio trocável (Mg) do solo incubado com biochar de esterco bovino não peletizado e peletizado, sem e com a aplicação de corretivo da acidez, sem e com a aplicação de fertilizante.....   | 37 |
| Tabela 4 – Acidez trocável (Al), acidez potencial (H+Al), CTC potencial (T), saturação por bases (V) e carbono orgânico no solo (COS) do solo incubado com biochar de esterco bovino não peletizado e peletizado, sem e com a aplicação de corretivo da acidez, sem e com a aplicação de fertilizante.....  | 41 |
| Tabela 5 – Biomassa seca de parte aérea (BSPA), nos cinco ciclos de cultivo (cortes), biomassa seca de parte aérea total (BSPAT) e biomassa seca radicular (BSRA) do capim <i>Urochloa brizantha</i> cv. BRS Paiaguás, considerando o solo incubado com biochar de esterco bovino não peletizado e peletizado, sem e com a aplicação de corretivo da acidez, sem e com a aplicação de fertilizante..... | 45 |
| Tabela 6 – Acúmulo médio de macronutrientes, nos cinco ciclos de cultivo do capim <i>Urochloa brizantha</i> cv. BRS Paiaguás, considerando o solo incubado com biochar de esterco bovino não peletizado e peletizado, sem e com a aplicação de corretivo da acidez, sem e com a aplicação de fertilizante.....  | 47 |
| Tabela 7 – Acúmulo médio de micronutrientes, nos cinco ciclos de cultivo do capim <i>Urochloa brizantha</i> cv. BRS Paiaguás, considerando o solo incubado com biochar de esterco bovino não peletizado e peletizado, sem e com a aplicação de corretivo da acidez, sem e com a aplicação de fertilizante.....  | 48 |

## SUMÁRIO

|          |   |    |
|----------|---|----|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b> .....   | 13 |
| <b>2</b> | <b>OBJETIVOS</b> .....  | 15 |
| 2.1      | Objetivo Geral.....   | 15 |
| 2.2      | Objetivos Específicos.....  | 15 |
| <b>3</b> | <b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....  | 16 |
| 3.1      | Desenvolvimento sustentável: desafios e perspectivas .....                        | 16 |
| 3.2      | <i>Urochloa brizantha</i> cv. BRS Paiaguás.....                                   | 17 |
| 3.3      | Manejo das pastagens.....   | 18 |
| 3.4      | Histórico do biochar .....  | 19 |
| 3.5      | Biochar e o processo de pirólise .....  | 20 |
| 3.6      | Peletização do biochar.....   | 22 |
| <b>4</b> | <b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....   | 24 |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....   | 31 |
| 5.1      | Caracterização do biochar .....   | 31 |
| 5.2      | Propriedades químicas do solo .....   | 33 |
| 5.3      | Crescimento e nutrição mineral de <i>Urochloa brizantha</i> cv. BRS Paiaguás..... | 42 |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÕES</b> .....   | 49 |
| <b>7</b> | <b>REFERÊNCIAS</b> .....  | 50 |

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos principais obstáculos na atividade agrícola consiste no aumento da produtividade com o menor custo e menor impacto ambiental possível, ou seja, ampliar a produção de maneira mais sustentável e com um viés ecológico. Os fertilizantes minerais são amplamente utilizados, para a obtenção de altas produtividades, o que promove, em longo prazo, um esgotamento dos recursos naturais e desequilíbrios ao meio ambiente (PATHY; RAY; PARAMASIVAN, 2020). Nesse sentido, visando à redução da pressão sobre os recursos naturais, matéria-prima dos fertilizantes minerais, e a disposição segura de resíduos orgânicos no ambiente, o biochar apresenta-se como alternativa sustentável (YU *et al.* 2018), além de contribuir para o aumento e a conservação dos estoques de carbono do solo.

O termo biochar ou biocarvão, idealizado a partir do conhecimento da denominada Terra Preta de Índio da Região Amazônica, refere-se a um material sólido, rico em carbono, obtido da transformação termoquímica da biomassa sob baixa atmosfera de oxigênio, denominado pirólise (LAL *et al.*, 2016). Diferença do carvão vegetal em razão do uso, uma vez que o biochar não é utilizado como combustível (MUKHERJEE; LAL, 2016; ZAMAN *et al.*, 2017).

O uso do biochar se justifica, primeiramente, pela possibilidade de reciclagem de grandes quantidades de resíduos orgânicos (ABDELHAFEZ; LI; ABBAS, 2014), diminuindo os riscos de poluição associados ao descarte desses materiais no meio ambiente (AHMAD *et al.*, 2014). Em segundo lugar, diferentemente da incorporação ao solo de resíduos orgânicos *in natura*, o biochar eleva o armazenamento de carbono no solo, já que esse material apresenta alta concentração de carbono estável, de degradação lenta (JOSKO *et al.*, 2013; NOVOTNY *et al.*, 2015), reduzindo, desse modo, as emissões de gases de efeito estufa (GWENZI *et al.*, 2016).

Como condicionador do solo, o biochar aumenta o pH, a disponibilidade de nutrientes, a capacidade de troca de cátions e a retenção de água pelo solo (SPOKAS *et al.*, 2014); diminui a densidade; altera a microbiota do solo, com efeitos positivos para as associações plantas - microrganismos (HAMMER *et al.*, 2014); influencia no metabolismo de plantas e microrganismos do solo, alterando a produção de compostos relacionados ao crescimento das plantas (VIGER *et al.*, 2015) e possibilita uma redução na aplicação de fertilizantes minerais e calcário em solos tropicais (GLASER *et al.*, 2015; MOSHARROF *et al.*, 2021).

É importante salientar que o biochar pode ser produzido utilizando-se de vários tipos de biomassas, como esterco bovino (GAVILI; MOOSAVI; MORADI CHOGHAMARANI, 2018), dejetos de galinha (COLEN *et al.*, 2020; LIM; LEE; OK, 2015), casca de arroz (TORRES *et al.*, 2020), palha de trigo (WALI *et al.*, 2020), lodo de esgoto (ZELAYA *et al.*, 2019), entre outros resíduos, o que lhe confere diferentes características químicas, dando, assim, diversificação ao processo e maiores possibilidades de aplicação. Nesse contexto, as propriedades do biochar vão depender da matéria-prima utilizada, bem como das configurações aplicadas à pirólise, como: temperatura, tempo de residência, taxa de aquecimento, tempo de resfriamento e pressão (ZAMAN *et al.*, 2017).

No entanto a viabilidade do uso do biochar em grandes áreas ainda é controverso, pelas elevadas doses a serem utilizadas e seus efeitos na produção das culturas (MUKHERJEE; LAL, 2016), assim como os efeitos dos finos de biochar. Em detrimento do pequeno tamanho das partículas, no momento da aplicação ao solo, existem perdas do material carbonizado por deriva, além de intoxicação dos aplicadores

por aspiração, tendo em vista que se têm diversos componentes tóxicos nos finos de biochars (LI *et al.*, 2018).

Na tentativa de contornar as limitações do uso de doses elevadas e dos efeitos do dos finos de biochar, uma alternativa é produzir pellets de biochar enriquecidos com nutrientes, semelhante aos fertilizantes organominerais. Nesse sentido, uma primeira hipótese é que, mesmo em pequenas quantidades, o biochar enriquecido com nutrientes atua como condicionador de solo. Uma segunda hipótese é que a peletização elimina ou diminui a emissão de finos de biochar para o aplicador e proporciona uma liberação gradual dos nutrientes.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

- Avaliar os efeitos da aplicação de biochar de esterco bovino nas propriedades químicas do solo e no crescimento de *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o biochar peletizado e não peletizado, na presença e na ausência de corretivo de acidez do solo, com e sem a adição de fosfato de potássio (PK), nas propriedades químicas do solo;
- Avaliar o biochar peletizado e não peletizado, na presença e na ausência de corretivo de acidez do solo, com e sem a adição de PK, no crescimento de *U. brizantha* cv. BRS Paiaguás.



### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Desenvolvimento sustentável: desafios e perspectivas

Em função do aumento da demanda por alimentos, levando-se em conta o ambiente global, a agricultura tem sido desafiada constantemente a produzir mais. Além disso, a própria sociedade tem apontado para a necessidade de se produzir alimentos de melhor qualidade, somado a maior cuidado com os recursos naturais. Essa dinâmica tem sobressaído, em detrimento da ampliação dos debates, bem como a conscientização, no que se refere à sustentabilidade e à preservação do meio ambiente, demonstrando-se, além do mais, a necessidade de se preocupar com as futuras gerações (SEVERO *et al.*, 2019).

Em especial, após a Revolução Verde, a utilização acentuada de fertilizantes minerais foi sendo cada vez mais proeminente no âmbito agrícola, buscando-se elevação produtiva, a fim de atender as demandas populacionais e o crescimento econômico. Entretanto o emprego demasiado dos adubos minerais tem ocasionado uma série de inconvenientes, os quais, sobretudo, com a ascensão da finitude dos recursos ambientais e os impactos socioeconômicos decorrentes, têm sido regularmente sinalizados, como, por exemplo: a lixiviação, contaminação, degradação, erosão dos solos, perda da biodiversidade, eutrofização dos corpos d'águas, além de problemas ocasionados à própria saúde humana (SERRA *et al.*, 2016).

Ante a esses pontos, a agricultura vigente encontra-se diante de vários desafios, entre os quais: a conservação dos recursos naturais; aplicação de técnicas com menor impacto ambiental e menor custo; potencialização produtiva com o mínimo de fertilizantes externos e a obtenção de produtos de boa qualidade, que atendam às exigências do mercado (MALORGIO; MARANGON, 2021).

Nessa perspectiva, deve-se considerar que, entre os macronutrientes mais utilizados na agricultura (N, P e K), os elementos P e K são recursos não renováveis, havendo especialmente discussões sobre o P, no que diz respeito à sua disponibilidade geológica – mais especificamente quanto ao esgotamento das reservas de rochas fosfáticas (ALEWELL *et al.*, 2020; KOHN; ZIMMER; LEINWEBER, 2018).

É relevante destacar que o Brasil está entre os países que mais possui dependência externa de fertilizantes minerais, apresentando altas importações, o que influencia nos custos de produção das culturas. O país está atrás apenas da China, Índia e dos Estados Unidos. Tal dependência está associada principalmente à distribuição geográfica das fontes dos nutrientes mais utilizados na agricultura, que, geralmente, encontram-se concentradas em países específicos, a exemplo da Rússia, que detém produção expressiva dos adubos potássicos (GALEMBECK; GALEMBECK; DOS SANTOS, 2019).

Para contornar essas limitações, a utilização de fontes alternativas torna-se de grande valia. Uma das formas está no aproveitamento de resíduos agrícolas, considerando a potencial diminuição da poluição causada pelos resíduos, haja vista que, com a disposição inapropriada, têm-se inconvenientes ambientais consideráveis (ABDELHAFEZ; LI; ABBAS, 2014, FINATTO *et al.*, 2013). Além disso o aproveitamento dos nutrientes contidos nos resíduos diminui a pressão sobre os recursos naturais para a produção de fertilizantes. Neste contexto, uma das técnicas é a carbonização dos resíduos orgânicos, denominada de pirólise, quando na ausência ou concentração reduzida de oxigênio, que, além de aproveitar os resíduos

na agricultura, colabora para a diminuição do uso de fertilizantes minerais, contribui para o sequestro de carbono e à melhoria das propriedades do solo (LEHMANN; JOSEPH, 2009).

### 3.2 *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás

As pastagens constituem-se fonte alimentar predominante para os animais ruminantes. A despeito do Brasil apresentar grande potencial produtivo de forragens, em determinadas épocas do ano, durante o período seco, ocorre decréscimo na produtividade, isto é, uma redução na oferta de matéria seca, em razão das condições climáticas adversas (DOS SANTOS *et al.*, 2021).

A adoção de estratégias de manejo da planta e do solo são essenciais, a fim de se evitar a degradação das pastagens e, conseqüentemente, maximizar a produtividade e o valor nutritivo da forragem. Nessa perspectiva, a seleção de gramíneas de boa produtividade e qualidade, tolerantes ao período seco, é condição determinante para a maior oferta de alimentos aos animais criados extensivamente, no período das secas (PEREIRA *et al.*, 2018a; DA SILVA *et al.*, 2016).

O gênero *Urochloa* pertence à família *Poaceae*, subfamília *Panicoideae* e tribo *Paniceae*. Esse gênero detém várias espécies de plantas espalhadas em regiões tropicais e subtropicais, no continente asiático, americano e, principalmente, no continente africano (MILES; MAASS; DO VALLE, 1996). Além disso, consiste na principal gramínea cultivada no Brasil, com participação considerável na esfera produtiva, seja de carne ou de leite (DE PAULA *et al.*, 2017).

Uma das cultivares de *U. brizantha*, o capim Paiaguás, lançado pela Embrapa em 2013, possui, entre algumas de suas características, a boa capacidade de adaptação às condições edafoclimáticas de diversas regiões brasileiras, em solos ácidos e de média fertilidade e em condições de baixa disponibilidade hídrica (EMBRAPA, 2013; SANTOS FILHO *et al.*, 2021). Ainda, de acordo com esses autores, o capim Paiaguás destaca-se pelo seu potencial produtivo, durante o período seco, com produção de forragem de bom valor nutricional, podendo ser empregada em consórcio com outras culturas.

Apesar da rusticidade, as pastagens do gênero *Urochloa* mostram-se responsivas às adubações com os macronutrientes primários (N, P e K), embora o capim Paiaguás seja mais exigente em nutrientes que a cultivar Marandu – por ser uma espécie mais rústica em condições desfavoráveis (DOMINGUES *et al.*, 2021; MELO *et al.*, 2021). Nas condições dos solos do Cerrado, os quais são deficientes especialmente em P, uma boa eficiência de absorção é fundamental para o bom desenvolvimento da cultura (MARTHA JÚNIOR *et al.* 2007).

No trabalho realizado por Euclides *et al.* (2016), ao avaliarem duas cultivares do gênero *Urochloa*, sendo o capim Paiaguás e o Piatã, durante a estação seca, foi possível observar maior taxa de rebrota em 30% e incremento de 186,67% no acúmulo de forragem, para o capim Paiaguás. Segundo os autores, esses resultados significativos para essa cultivar resultaram em um aumento de, aproximadamente, 50% na taxa de lotação de animais, além de um ganho expressivo de peso vivo dos animais por área, em comparação à cultivar Piatã.

Nesse sentido, ressalta-se que as braquiárias são plantas que têm grande potencial produtivo de forragens em solos com maior fertilidade ou corrigidos via adubação. Solos com baixa fertilidade natural ou não corrigidos, atrelados ao manejo inadequado, como a não reposição dos nutrientes extraídos pelas

plantas, restringem tanto a produtividade quanto a qualidade de alimentos a pasto (CAVALCANTI *et al.*, 2021).

### 3.3 Manejo das pastagens

O manejo das pastagens diz respeito à adoção de práticas na propriedade que considere a planta, o solo e o animal, com o objetivo de aumentar a reciclagem de nutrientes no sistema, a produção de matéria seca da gramínea, e, como consequência, a produtividade animal, tornando o sistema de produção mais sustentável e racional (PEREIRA *et al.*, 2018b). Dessa forma, evita-se a degradação da pastagem, situação na qual se tem a redução do valor nutritivo e da produtividade da forrageira, bem como da sua capacidade de recuperação espontânea (DE PAULA *et al.*, 2017).

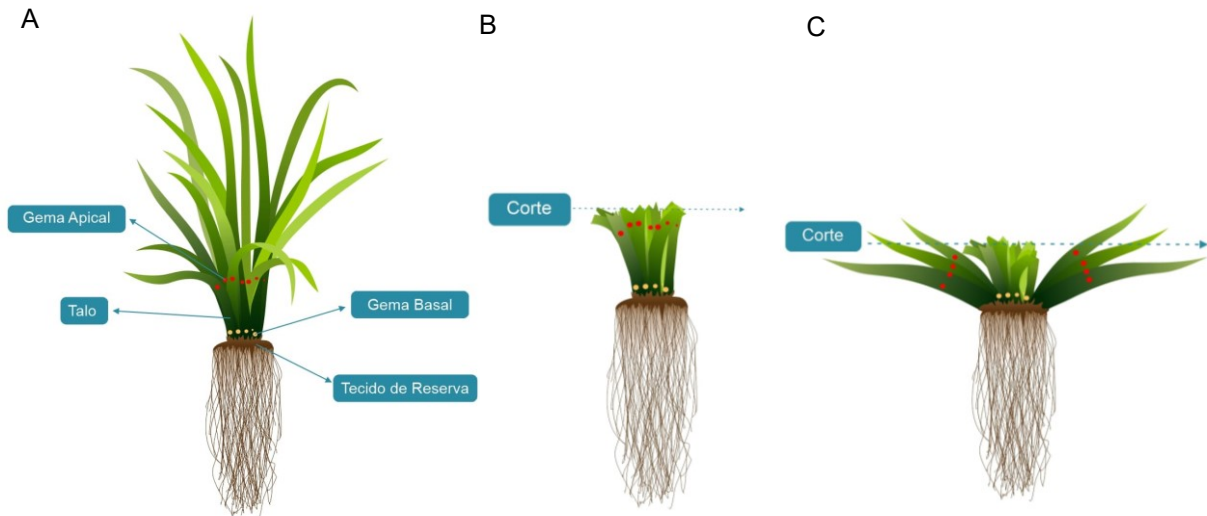
Nesse sentido, o produtor deve atentar-se à lotação animal, uma vez que esse aspecto se relaciona à rigorosidade da desfolha e ao resíduo de folhas conservado no dossel da pastagem, que, por sua vez, está associado à capacidade de rebrota da planta. Isso posto, é necessário evitar o subpastejo e o superpastejo (ALVES *et al.*, 2014; DA SILVA *et al.*, 2016).

Ademais, deve-se prezar pela manutenção da fertilidade do solo, de modo a fornecer à planta os nutrientes necessários para o seu bom desenvolvimento, a fim de que ela se regenere, após as perturbações sofridas pelo pastejo, mantendo, ao longo do tempo, a qualidade e a produtividade da forragem (FERREIRA; TAVARES FILHO; FERREIRA, 2010).

O resíduo foliar está associado à severidade da desfolha, a qual é definida pela altura de corte do pasto realizada pelo animal (JOCHIMS; DA SILVA; PORTES, 2018; PIRES, 2006). Com isso, a situação ideal é quando não se tem a extração excessiva da pastagem – que ocorre com a superlotação. Quando o pasto é cortado numa altura apropriada, o meristema apical não é atingido e a planta é estimulada a rebrotar, por meio da assimilação dos tecidos de reserva (FIGURA 1 A e B).

De outra forma, com um mau manejo, seja pela quantidade de animais acima do que a pastagem sustenta, seja pelo pastejo excessivo (tempo de permanência dos animais na pastagem), tem-se a remoção das folhas abaixo do meristema apical. Nessa conjuntura, há uma exaustão das reservas de carboidrato, em função da remoção foliar intensa, reduzindo, então, a robustez da rebrota (redução do perfilhamento, do crescimento de novas folhas e raízes), além da longevidade da forrageira (FIGURA 1 C).

Figura 1 – Representação do capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás. (A) Partes da planta, (B) altura de corte ideal e (C) mau manejo.



Fonte: Do autor, 2022.

### 3.4 Histórico do biochar

A agricultura na Região Amazônica tem sido limitada, tendo em consideração, sobretudo, as restrições quanto às propriedades químicas do solo, relacionadas às condições que favorecem o intemperismo do solo, como elevadas temperaturas e precipitação pluviométrica. Soma-se a isso os contínuos impactos ambientais gerados pelo desmatamento severo, o que tem preocupado diversos órgãos ambientais no mundo (ELLWANGER *et al.*, 2020).

Apesar disso, solos de coloração escura foram encontrados na Região Amazônica, denominados de Terra Preta de Índio (TPI) ou Terra Preta Arqueológica (TPA), os quais detinham propriedades químicas bastante distintas dos solos predominantes na Região, que são majoritariamente pobres e ácidos. A TPI é caracterizada como sendo solos de maior fertilidade (elevada CTC e altos teores de P, Ca, Mg, Zn e Mn), ricos em matéria orgânica, nas camadas que variam de 10 a 200 cm de profundidade (LEHMANN *et al.*, 2003; MACEDO *et al.*, 2019; TEIXEIRA *et al.*, 2009).

De acordo com algumas hipóteses, a TPI foi formada por aportes exógenos da deposição aluvial de carbono e elementos minerais (SILVA *et al.*, 2021) e, ou, em áreas de ocupação humana pré-histórica, pelo acúmulo de carbono pirogênico no solo (KERN *et al.*, 2017). De acordo com a segunda hipótese, as atividades antropogênicas antigas nas áreas amazônicas, nomeadamente realizadas por indivíduos pré-históricos, evidenciadas por comprovações arqueológicas, são as responsáveis pela formação da TPI. Nesses locais foram encontrados restos de artefatos cerâmicos, pertencentes a tribos indígenas pré-colombianas, com solos ricos em nutrientes e com a coloração escura. Essa cor se deve à elevada concentração de matéria orgânica decomposta, tanto de origem vegetal, como folhas, sementes, entre outros, como animal, na forma de resíduos de peixes, dejetos, ossos, etc, além da presença de altas quantidades de cinzas e resíduos de fogueiras, representada por aporte de carvão vegetal. Independentemente da hipótese de formação, fato é que a TPI é um microecossistema peculiar, no qual

as suas propriedades relacionadas à fertilidade do solo e ao estoque de carbono não se esgotam de maneira rápida (DE SOUZA *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2021; TEIXEIRA *et al.*, 2009).

Em vista disso, o biochar, também chamado de biocarvão, foi objeto de diversas pesquisas, por meio das quais se verificou a relevância do seu uso, sobretudo, para solos com baixa fertilidade, na estabilização da matéria orgânica, no aumento da CTC, pela alta densidade de cargas nas partículas (FÁTIMA *et al.*, 2021; TORRES *et al.*, 2020), e no aumento da retenção de água no solo (GONDIM *et al.*, 2018). Ademais, o sequestro de carbono por um grande período, por sua maior permanência no solo, sem sofrer alterações significativas em sua estrutura, propicia a mitigação das alterações climáticas, por meio da diminuição da emissão de gases atrelados ao efeito estufa (LEHMANN; GAUNT; RONDON, 2006). Dessa forma, a utilização de biochar permite, num prazo consideravelmente curto, a formação da “Nova Terra Preta de Índio”, por contribuir para a estabilidade e recalcitrância do carbono orgânico do solo, melhorias das propriedades do solo e de uma agricultura mais sustentável nos trópicos úmidos (LUO *et al.*, 2016).

Outra propriedade relevante a ser destacada é que, em função da estrutura porosa do biochar, a sua adição ao solo promove a estruturação de habitats que favorecem a presença e desenvolvimento de microrganismos (LEHMANN *et al.*, 2011), o que constitui um microambiente adequado à maior biodiversidade microbiana (YAN *et al.*, 2021).

Ainda, no contexto da produção sustentável, o biochar, por suas propriedades, pode favorecer o maior crescimento e desenvolvimento das plantas (LIMA *et al.*, 2019). As aplicações de biochar se estendem também na recuperação de áreas degradadas, associadas à agricultura intensiva (LATAWIEC *et al.*, 2019), e na remediação de áreas contaminadas, por exemplo, por metais pesados, com sua alta capacidade de adsorção de poluentes (LEHMANN; JOSEPH, 2009).

Portanto, a produção de biochar, a partir de resíduos orgânicos, é alternativa a ser considerada, sobretudo, num contexto de manifestação constante da temática atrelada à sustentabilidade, haja vista as mais variadas influências desse material, como, por exemplo, no condicionamento do solo, no sequestro de C – com conseqüente retardo de sua liberação ao meio ambiente, na forma de CO<sub>2</sub>, no aumento da disponibilidade de água e nutrientes às plantas, entre outros fatores (SEMIDA *et al.*, 2019).

### **3.5 Biochar e o processo de pirólise**

O biochar é um produto rico em carbono resultante da biomassa aquecida em temperaturas de, aproximadamente, 400 °C, em um ambiente fechado, sob condição de ausência ou baixa concentração de oxigênio. Em outros termos, o biocarvão é proveniente de uma tecnologia industrial, à qual os resíduos orgânicos são submetidos, levando-se em consideração parâmetros peculiares de temperatura, atmosfera ambiente e pressão, sendo esse procedimento denominado de pirólise (LEHMANN; JOSEPH, 2009).

A pirólise é um processo de degradação, decomposição ou conversão termoquímica de resíduos orgânicos, que ocorre numa atmosfera inerte. Durante a pirólise, os materiais presentes na biomassa, isto é, lignina, celulose, hemicelulose, proteínas, entre outros, são degradados em moléculas menores, numa temperatura de 350 a 750 °C, ou maiores. No decorrer do processo, tem-se a formação de três importantes fases ou produtos: a sólida, na forma de biocarvão; a líquida, representada pelos vapores condensáveis,

como o bio-óleo e a gasosa, na fração de vapores não condensáveis, constituída pelos gases combustíveis (JOSEPH *et al.*, 2021; ZAMAN *et al.*, 2017).

As porções geradas de cada uma das fases elencadas estarão condicionadas, basicamente, à temperatura aplicada, à taxa de aquecimento, às características da biomassa utilizada, ao tempo de carbonização e à pressão envolvida no sistema (NOVOTNY *et al.*, 2015).

De acordo com os ajustes dos parâmetros citados, classifica-se o tipo de pirólise. A pirólise lenta é caracterizada por temperaturas entre 400 e 500 °C, numa taxa de aquecimento de, aproximadamente, 0,1 a 1 °C s<sup>-1</sup>, com tempo de permanência de 5 a 30 min, que favorece a formação do biochar em maiores proporções, sendo os demais produtos obtidos em quantidades menores. Por outro lado, a pirólise rápida é definida pela aplicação de temperaturas mais elevadas, entre 850 e 1250 °C, numa taxa de aquecimento de 10 a 200 °C, por um período de 1 a 10 s, que promove a produção em maior quantidade de bio-óleo (TRIPATHI; SAHU; GANESAN, 2016).

As reações de pirólise podem ser divididas em dois estágios principais, os quais são conhecidos como pirólise primária e pirólise secundária. A primeira é caracterizada pelas reações de descarboxilação, desidrogenação e desidratação da biomassa. Em função da ação da temperatura, a biomassa é clivada e desvolatilizada. Os produtos primários são, por exemplo: CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub> e alguns hidrocarbonetos, como o metano – CH<sub>4</sub>, e o etileno – C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>. Nessa reação, tem-se a formação do biochar. Na segunda etapa, os reagentes são os produtos da primeira etapa, os quais passam por processos de polimerização e craqueamento térmico, ou seja, rompimento de ligações químicas complexas em moléculas de baixa massa molecular (TRIPATHI; SAHU; GANESAN, 2016; SAFDARI *et al.*, 2018).

Na pirólise, os principais parâmetros para a determinação das reações envolvidas são a temperatura e o tempo de residência. Para a formação do biochar, temperaturas mais baixas associadas a um tempo de residência maior viabilizam a diminuição dos gases gerados em reações secundárias. De outro modo, na formação do óleo pirolítico, por exemplo, busca-se menor tempo de residência do material, justamente para que ele não entre em reações secundárias e, com isso, os voláteis produzidos possam ser condensados (MONTROYA; CHEJNE-JANNA; GARCIA-PÉREZ, 2015).

Dessa maneira, a pirólise atua no sentido de romper as ligações que existem na biomassa carbono-carbono e, ademais, gerar ligações carbono-oxigênio, isto é, um processo de oxirredução. O resultado primário da reação está ligado à formação de grupos funcionais na superfície do biochar, como: carboidratos, aldeídos, cetonas, álcoois, ácidos carboxílicos, entre outros, os quais se tornam sítios reativos que viabilizam a interação com outros elementos no solo (FÁTIMA *et al.*, 2021; JANU *et al.*, 2021).

A propriedade tida pelo biochar de ser um eficiente sequestrador de C está relacionado ao fato de, na sua estrutura interna, haver um alto teor de C – sobretudo constituído de compostos aromáticos, o que lhe confere uma estrutura inerte, similar ao grafite, isto é, natureza recalcitrante (LEHMANN; JOSEPH, 2009). Assim, a sua degradação é muito mais lenta, além de gerar no solo, quando aplicado, um alto reservatório estável de carbono.

### 3.6 Peletização do biochar

Diversos autores relataram os benefícios do uso do biochar na agricultura, por aumentar a fertilidade do solo, bem como o rendimento das culturas (FÁTIMA *et al.*, 2021; TORRES *et al.*, 2020; ZHU *et al.*, 2018). Nesse aspecto, elenca-se a sua utilização como alternativa ao *modus operandi* convencional, por meio do qual se tem a utilização intensiva de fertilizantes minerais. A tecnologia da pirólise constitui-se uma forma sustentável e promissora na conversão termoquímica da biomassa em um produto rico em nutrientes (SEMIDA *et al.*, 2019).

Apesar disso, faz-se necessário destacar alguns inconvenientes que limitam a utilização do biochar no campo, como: o pequeno tamanho de suas partículas, a baixa densidade de partículas, a dificuldade de transporte, manuseio e armazenamento do material (KONG *et al.*, 2013; MOHAMMADI, 2021). Além disso, por ser um pó que possui componentes nocivos à saúde humana em sua composição, pode ocasionar problemas respiratórios ao aplicador (LI; BAIR; PARIKH, 2018). Nesse sentido, a tecnologia da peletização ou densificação apresenta-se como uma forma de contornar essas dificuldades, realizando a conversão da biomassa pirolisada em pellets (BAZARGAN; ROUGH; MCKAY, 2014; MOHAMMADI, 2021; XING; FAN; JIANG, 2018).

A peletização consiste na compactação ou compressão dos resíduos de biomassa, utilizando-se, ou não, de aglutinantes ou ligantes, por meio da aplicação de força mecânica, resultando num material sólido de tamanho uniforme (LI *et al.*, 2015; MOHAMMADI, 2021). Os pellets gerados possuem baixo teor de umidade, formas regulares e, também, diminuem os problemas relacionados ao transporte, manuseio e armazenamento, pela sua estabilidade física e mecânica (XING; FAN; JIANG, 2018).

De acordo com o tipo de aglutinante utilizado no processo de peletização, os pellets podem apresentar diferentes características quanto à hidrofobicidade, durabilidade e resistência à compressão (HU *et al.*, 2015). Bazargan, Rough e McKay (2014) verificaram que, sem a adição de água ou a utilização de aglutinantes, os pellets de biochar resultantes apresentavam-se frágeis e quebradiços, de modo que qualquer tentativa de retirá-los do compactador resultava na sua desintegração em pequenas partículas.

Isso posto, o aglutinante atua na consistência do grânulo, por meio da agregação das partículas do material carbonizado, enquanto a força mecânica é aplicada ao processo de peletização. A lignina, por exemplo, é um dos aglutinantes naturais, dada a sua plasticidade. Com a temperatura de processamento aplicada, ela se amolece termicamente e promove a aglomeração das partículas, tendo em vista a formação de forças atrativas (PENG *et al.*, 2021).

Estudos demonstraram a utilização de vários tipos de aglutinantes, como aditivos na peletização, tais como: o amido de milho, resíduos de polietileno e polipropileno (PENG *et al.*, 2021), NaOH e Ca(OH)<sub>2</sub> (KONG *et al.*, 2013; HU *et al.*, 2015), bio-óleo, subproduto da pirólise (RIVA *et al.*, 2019), amido de ervilha e o derivado celulósico carboximetilcelulose (WANG *et al.*, 2022).

Vale ressaltar a importância da adição de água ao biochar, no processo de peletização, uma vez que ela funciona como um lubrificante, contribuindo à redução da resistência ao atrito entre as partículas do biochar e o compactador, além de aumentar as forças coesivas no pellet, como ligações de hidrogênio, que conferem maior estabilidade ao grânulo (HU *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2015; PENG *et al.*, 2021).

O amido, mistura de polissacarídeos, sobretudo, a amilose e a amilopectina, ao serem aquecidos em água, tem as suas ligações intermoleculares reduzidas, formando uma solução viscosa, processo conhecido por gelatinização, que funciona como aglutinante (BAZARGAN; ROUGH; MCKAY, 2014).

Os aglutinantes melhoram as características desejáveis dos pellets, sendo fundamental a pesquisa por materiais de baixos custos para a que a peletização seja viável e sustentável (PENG *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2022).



#### 4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento consistiu de duas fases. Na primeira fase, foi desenvolvido um protocolo para a produção de pellets de biochar e, na segunda, realizou-se o cultivo de *U. brizantha* cv. BRS Paiaguás.

O biochar utilizado no experimento foi oriundo de esterco bovino, coletado em uma área de alimentação de vacas leiteiras do ICA/UFMG. A partir dessa matéria-prima, foram confeccionadas manualmente esferas de, aproximadamente, 4 cm de diâmetro (FIGURA 2 A) e secas a  $103 \pm 2$  °C, por um período de 48 h para a completa desidratação, até massa constante (FIGURA 2 B).

Para a produção de biochar, as esferas secas foram dispostas, em um recipiente de aço hermeticamente fechado, em uma mufla industrial e submetidas a um processo de pirólise lenta (NOVOTNY *et al.*, 2015). O reator pirolítico foi submetido a uma taxa de aquecimento de  $5$  °C  $\text{min}^{-1}$ , até alcançar a temperatura de 450 °C, e permaneceu nessa temperatura por 30 min, o que constituiu o tempo de residência da biomassa para a formação do biocarvão. O biochar foi resfriando dentro da mufla até temperatura ambiente e, em seguida, triturado (FIGURA 2 C) e passado em peneira com malha de 0,25 mm (TORRES *et al.*, 2020).

Figura 2 – (A) Confeção de esferas de 4 cm a partir do esterco bovino; (B) Esferas secas e (C) Biochar triturado.



Fonte: FERNANDES, 2022.

A caracterização do biochar quanto ao pH e à condutividade elétrica (CE) foi realizada, de acordo com o método descrito por Rajkovich *et al.* (2012), por meio da medição em água deionizada, utilizando-se da proporção biochar:água deionizada de 1:20, após 1,5 h de agitação para garantir o equilíbrio entre a solução e as superfícies do biochar.

O teor de cinzas foi determinado pelo método especificado em ASTM D1762-84 (ASTM, 2007), no qual cerca de 1 g de amostra de biochar foi seco, em um cadinho descoberto, numa temperatura de 750 °C, durante 6 h, sendo, após, resfriado e pesado. O percentual de cinzas foi determinado, segundo a seguinte equação (EQUAÇÃO 1), sendo massa residual das cinzas (MRC) e massa da amostra (MA):

$$\text{Cinzas (\%)} = \frac{\text{MRC}}{\text{MA}} \times 100 \quad (1)$$

Os teores de carbono total (C) e nitrogênio total (N) do biochar foram definidos, por meio de combustão seca a 950 °C, utilizando-se de um analisador elementar. Os demais macro e micronutrientes foram analisados por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS), após digestão em micro-ondas de 0,5 g de amostra de biochar com  $10 \pm 0,1$  mL de ácido nítrico ( $\text{NOH}_3$ ) concentrado, numa temperatura de  $175 \pm 5$  °C, por 4,5 a 10 min, de acordo com o método USEPA 3051.

Na primeira fase, para a produção dos pellets, foi utilizado o biochar de esterco bovino (BEB) em combinação com o fertilizante fosfato de potássio (PK –  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ). A fécula de mandioca foi utilizada como componente aglutinante, a fim de promover a consistência do grânulo (BAZARGAN; ROUGH; MCKAY, 2014).

Por meio de testes preliminares, a proporção definida, para a produção do fertilizante organomineral peletizado, foi de 40%:40%:20% de fertilizante, biochar e aglutinante, respectivamente. No caso de tratamentos com o biochar peletizado, sem a adição de fertilizante, utilizou-se a proporção de 80%:20% de biochar e aglutinante, respectivamente.

O fertilizante foi moído e misturado com o biochar e a fécula de mandioca. Em seguida, adicionou-se água destilada à mistura, que foi homogeneizada em um almofariz até a obtenção de uma consistência pastosa (FIGURA 3 A). A fim de atingir essa condição, para o pellet enriquecido com fertilizante e para o pellet não enriquecido com PK, foram necessários 65 e 140 mL de água destilada, respectivamente, para 100 g de mistura.

Em seguida, a mistura maleável foi introduzida, em um molde de polietileno com orifícios de 5,0 mm de diâmetro e 5,0 mm de altura, utilizando-se de uma espátula plástica (FIGURA 3 B e C). O molde preenchido com a mistura foi acondicionado numa estufa para secagem a 65 °C por um período de 30 min (DOS SANTOS *et al.*, 2019).

Figura 3 – Processo de preparação do fertilizante organomineral peletizado. (A) Mistura para a preparação do biochar peletizado; (B) Molde de polietileno para a incorporação da mistura e (C) Espátula plástica trapezoidal utilizada para a inserção da mistura no molde.



Fonte: Do autor, 2022.

Na segunda fase, o experimento foi conduzido em casa de vegetação, sendo realizado o cultivo de *U. brizantha* cv. BRS Paiaguás em vasos de 1,5 dm<sup>3</sup>. O solo utilizado correspondeu à camada de 0 a 20 cm de profundidade de um Latossolo coletado em uma área de Cerrado nativo.

O solo foi caracterizado quanto às suas propriedades físicas e químicas, de acordo com Teixeira *et al.* (2017), sendo: areia = 780 g kg<sup>-1</sup>; silte = 100 g kg<sup>-1</sup>; argila = 120 g kg<sup>-1</sup>; pH em água = 5,6; fósforo disponível (Mehlich 1) = 1,3 mg kg<sup>-1</sup>; fósforo remanescente = 37,3 mg L<sup>-1</sup>; potássio (Mehlich 1) = 11,4 mg kg<sup>-1</sup>; cálcio = 1,07 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; magnésio = 0,44 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; alumínio = 0,05 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; hidrogênio = 0,98 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; saturação por bases (V) = 58,49%; capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (T) = 3,32 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e carbono orgânico do solo (COS) = 0,49 dag kg<sup>-1</sup>.

Os tratamentos foram dispostos em um esquema fatorial 2x2x2+1, com cinco repetições (n=45), em delineamento inteiramente casualizado (DIC), sendo: biochar não peletizado e peletizado, sem e com aplicação de corretivo da acidez do solo, sem e com adição de fertilizante mineral (PK), além de um tratamento adicional constituído pelo solo natural, conforme apresentado na Tabela 1.



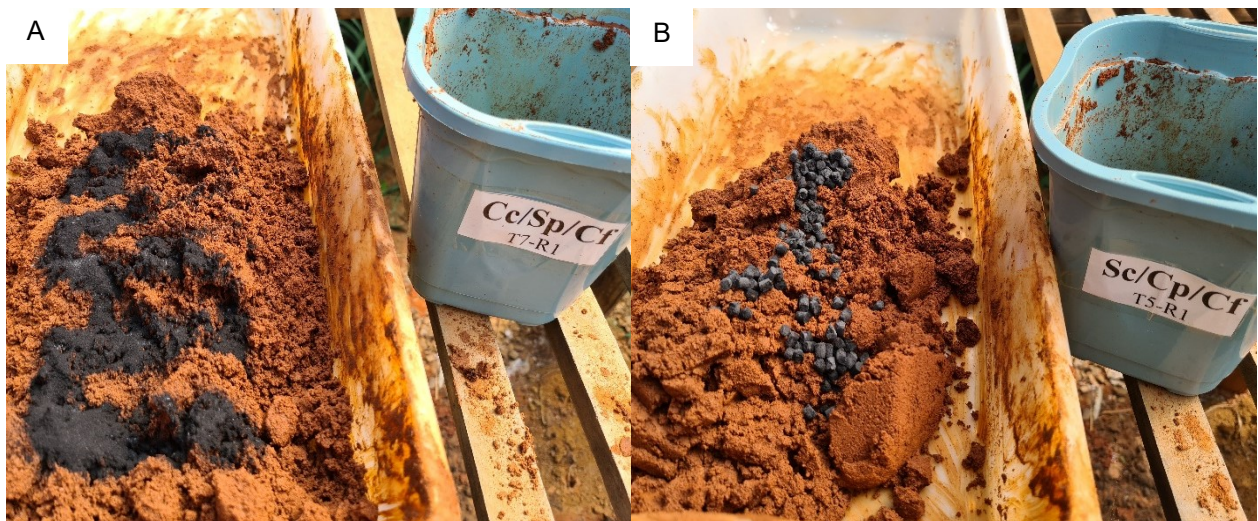
Tabela 1 – Estruturação experimental.

| Controle             | Peletização    | Calagem          | Fertilização  | Aplicação  |
|----------------------|----------------|------------------|---|--|
| Tratamento adicional | Não Peletizado | Sem Calagem      | Sem Fertilizante  | 5,8 g/vaso de biochar                              |
|                      |                | Com Calagem      | Com Fertilizante  | 5,8 e 1,31 g/vaso de biochar e PK, respectivamente |
|                      | Com Calagem    | Sem Fertilizante | 5,8 e 1,5 g/vaso de biochar e calcário, respectivamente           |  |
|                      |                | Com Fertilizante | 5,8, 1,5 e 1,31 g/vaso de biochar, calcário e PK, respectivamente |  |
| Solo natural         | Não Peletizado | Sem Calagem      | Sem Fertilizante  | 7,2 g/vaso de pellets                              |
|                      |                | Com Calagem      | Com Fertilizante  | 14,43 g/vaso de pellets                            |
|                      | Com Calagem    | Sem Fertilizante | 7,2 e 1,5 g/vaso de pellets e calcário, respectivamente           |  |
|                      |                | Com Fertilizante | 14,43 e 1,5 g/vaso de pellets e calcário, respectivamente         |  |

Fonte: Do autor, 2022.

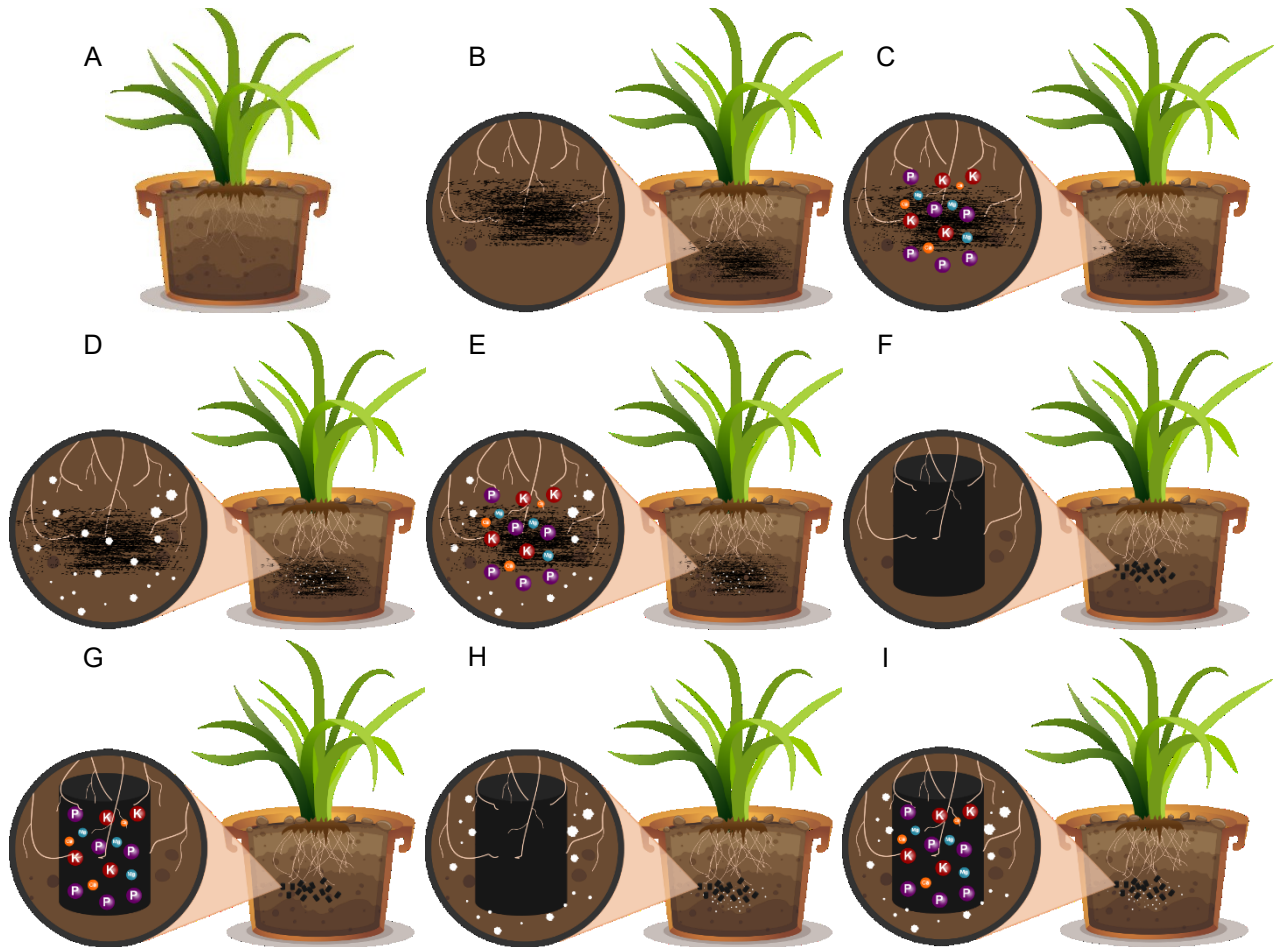
Para os tratamentos com a adição de corretivo de acidez, foi aplicado 1,5 g/vaso de calcário (carbonato de cálcio e magnésio na proporção de 4:1, Ca:Mg), a fim de elevar a saturação por bases para 60%. O período de incubação do corretivo foi de 30 dias, mantendo, nesse período, a umidade do solo próxima à capacidade de campo. Depois disso, foram incorporados ao solo de cada vaso os respectivos tratamentos (FIGURA 4 A e B), sendo: 5,8 g/vaso de biochar, para os tratamentos com o biochar não peletizado sem PK; 5,8 e 1,31 g/vaso de biochar e PK, respectivamente, para os tratamentos com o biochar não peletizado, enriquecidos com PK; 7,2 g/vaso de pellets, para os tratamentos com o biochar peletizado sem PK e, por último, 14,43 g/vaso de pellets, para os tratamentos com o biochar peletizado enriquecidos com PK. A fertilização mineral foi efetuada conforme recomendação sugerida por Malavolta (1980) para experimentos em vasos, em casa de vegetação, sendo aplicados  $200 \text{ mg dm}^{-3}$  de P e  $250 \text{ mg dm}^{-3}$  de K. A Figura 5 demonstra a esquematização do experimento.

Figura 4 – Aplicação dos tratamentos no solo. (A) Tratamento com a calagem, com o biochar não peletizado e com a fertilização com PK e (B) Tratamento sem a calagem, com o biochar peletizado enriquecido com PK.



Fonte: Do autor, 2022.

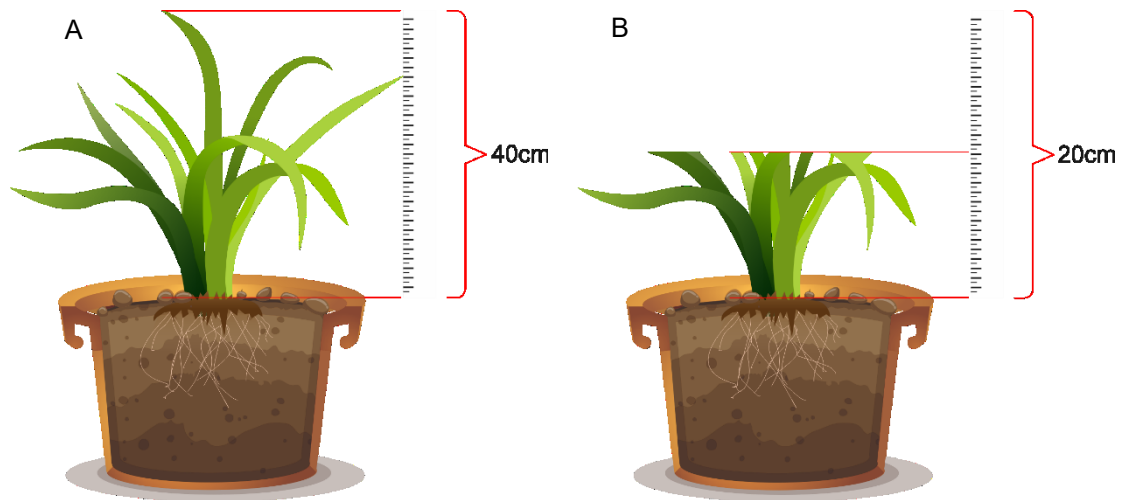
Figura 5 – Representação dos tratamentos experimentais. (A) solo natural; (B) biochar não peletizado, sem a calagem e sem a fertilização; (C) biochar não peletizado, sem a calagem e com a fertilização; (D) biochar não peletizado, com a calagem e sem a fertilização; (E) biochar não peletizado, com a calagem e com a fertilização; (F) biochar peletizado, sem a calagem e sem a fertilização; (G) biochar peletizado, sem a calagem e com a fertilização; (H) biochar peletizado, com a calagem e sem a fertilização; (I) biochar peletizado, com a calagem e com a fertilização.



Fonte: Do autor, 2022.

Em cada um dos vasos, foram colocadas dez sementes do capim *U. brizantha* cv. BRS Paiaguás e, depois de 13 dias após a semeadura, realizou-se o desbaste, sendo mantidas cinco plantas por vaso, as quais foram cultivadas por 129 dias. Nesse período, foram realizados cinco cortes da parte aérea das plantas, de acordo com o seu crescimento, definindo-se a altura de corte, conforme recomendações de manejo das pastagens, isto é, aos 40 cm de altura, cortam-se 20 cm acima do nível do solo, conforme representado na Figura 6 (MONTAGNER *et al.*, 2018; DO NASCIMENTO *et al.*, 2019).

Figura 6 – Altura de corte do capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás. (A) Altura de entrada: 40 cm e (B) altura de saída: 20 cm.



Fonte: Do autor, 2022.

Dado que o biochar utilizado apresentava baixa concentração de nitrogênio em sua composição, tendo em vista a composição da matéria-prima e a alta temperatura de pirólise (CHATTERJEE *et al.*, 2020), foram realizadas adubações nitrogenadas de cobertura, com  $45 \text{ mg dm}^{-3}$  de N, na forma de ureia, em todos os tratamentos, exceto no tratamento controle, após a realização de cada corte do capim.

Em cada corte foi determinada a biomassa seca de parte aérea (BSPA) do capim, por meio do recolhimento da parte aérea, a qual foi acondicionada em sacos de papel e secas em estufa de circulação forçada a  $65\text{-}70 \text{ }^\circ\text{C}$  por, aproximadamente, 72 horas até massa constante (LUSTOSA FILHO *et al.*, 2017). Além disso, foram determinadas a biomassa seca de parte aérea total (BSPAT), pela soma da BSPA de todos os ciclos de cultivo, e os teores de macro e micronutrientes no limbo foliar (diagnose foliar) (MALAVOLTA; VITTI; DE OLIVEIRA, 1997).

O valor acumulado de cada nutriente analisado foi obtido, multiplicando-se os teores de cada nutriente no tecido vegetal pela produção de matéria seca da parte aérea correspondente, de acordo com a Equação 2, sendo: acúmulo do nutriente (AN), teor do nutriente (TN) e produção de matéria seca (PMS). O acúmulo médio de cada nutriente foi determinado pela soma dos valores acumulados de cada macro e micronutriente, considerando todos os ciclos de cultivo, divididos por cinco.

$$\text{AN (g ou mg/planta)} = \text{TN} \times \text{PMS} \quad (2)$$

Após o período de cultivo da planta, foram determinados a biomassa seca radicular (BSRA) e os atributos do solo. Amostras de solos foram analisadas, de acordo com Teixeira *et al.* (2017), quanto ao pH (suspensão com 10 g de solo e 25 mL de água destilada); P e K disponíveis (100 mL de solução extratora Mehlich:  $\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1}$  e  $\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ ), quantificados por colorimetria e espectrofotometria de emissão de chama, respectivamente; Ca e Mg disponíveis e Al trocável (100 mL de solução de  $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$ ), determinados por espectrofotometria de absorção e titulação com  $\text{NaOH } 1 \text{ mol L}^{-1}$ , respectivamente; Acidez Potencial (75 mL de solução de  $\text{Ca(OAc)}_2 \text{ } 0,5 \text{ mol L}^{-1}$ , pH 7,0 e titulação com  $0,025 \text{ mol L}^{-1}$  de

NaOH) e COS (10 mL da solução de  $K_2Cr_2O_7$  0,0667 mol L<sup>-1</sup> e titulação com sulfato ferroso amoniacal 0,05 mol L<sup>-1</sup>). A partir dos resultados obtidos, foram calculados os valores de Soma de Bases (SB), T e V.

Os dados foram submetidos ao teste de homogeneidade e normalidade. Os tratamentos foram comparados pelo teste de F a 5% e o tratamento adicional comparado com os demais tratamentos pelo teste de Dunnett a 5%. O programa estatístico utilizado foi o R versão 3.6.3 – *R Development Core Team*.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização do biochar

O biochar de esterco bovino (BEB) (TABELA 2) apresentou pH alcalino, 9,8. Utilizando-se de esterco animal, resultados análogos foram encontrados por Revell, Maguire e Agblevor (2012), indicando a tendência de que biochars produzidos a partir desse resíduo apresentam pH alcalinos. Não somente a matéria-prima, mas também a temperatura de pirólise são fatores responsáveis pelo pH dos biochars (CONZ *et al.*, 2017; SOUZA *et al.*, 2021). A presença de compostos básicos nas cinzas do BEB, como óxidos, por exemplo, CaO, MgO e K<sub>2</sub>O, e hidróxidos como Ca(OH)<sub>2</sub>, Mg(OH)<sub>2</sub> e KOH, está relacionada ao pH. Estudos demonstram que quanto maior o teor de cinzas, maior o valor do pH do biochar (LEHMANN *et al.*, 2011; SARFARAZ *et al.*, 2020).

A condutividade elétrica (CE) relaciona-se à quantidade de sais dissolvidos numa solução. De modo análogo ao pH, a CE é dependente da matéria-prima e da temperatura de pirólise. A relação é que quanto maior a temperatura empregada ao processo, normalmente, maiores são os valores de CE (REHRAH *et al.*, 2014), em razão da perda de materiais voláteis. Biochars de resíduos de madeiras possuem menor CE, em comparação aos produzidos de esterco, tendo em vista o conteúdo de suas cinzas (RAJKOVICH *et al.*, 2012). O conhecimento da CE faz-se necessário, visto que as quantidades de sais do biochar podem resultar em efeitos inadequados ao solo e a determinadas plantas (LEHMANN; JOSEPH, 2009).

Dos Santos *et al.* (2019) observaram aumento da CE com o aumento da temperatura de pirólise, na faixa de 350 e 700 °C, tanto para o biochar de bagaço de cana-de-açúcar quanto para o biochar de serragem de madeira, sendo de 48,48 e 42,26%, respectivamente, em função da maior dissolução de sais solúveis em água.

O biochar utilizado, na presente pesquisa, apresentou um percentual de cinzas de 36,2% (TABELA 2). Esse valor está em concordância com os encontrados na literatura. Rajkovich *et al.* (2012), ao realizarem a pirólise de esterco de vacas leiteiras, em temperaturas de 300 a 600 °C, encontraram teores de cinzas de 18,84 a 39,23%. Nessa direção, Cantrell *et al.* (2012), trabalhando com biochar de esterco de aves, encontraram percentuais de 16,9 a 49,9%.

O teor de cinzas nos biochars também tem relação direta com a temperatura de pirólise (TRAZZI *et al.*, 2018), em virtude da redução de materiais voláteis e concentração da fração inorgânica. Além disso, é dependente da concentração de constituintes minerais na matéria-prima (DOS SANTOS *et al.*, 2019). Zhao *et al.* (2013), ao estudarem a influência da temperatura e da matéria-prima no rendimento e nas propriedades químicas do biochar, observaram altos teores de cinzas em biocarvão de esterco de animais, de 48,4 a 67,5%, em relação aos resíduos de colheitas, que variaram de 9,94 a 18%, produzidos a 500 °C. Esses resultados foram atribuídos ao maior teor de constituintes inorgânicos presentes no biochar de esterco de animais.

Durante o processo de pirólise, com a liberação de grupos funcionais de natureza ácida, as cinzas resultantes apresentam uma constituição primariamente básica. Nessa condição, os compostos mais abundantes nas cinzas estão na forma de bases, como, por exemplo, SiO<sub>2</sub>, CaO, K<sub>2</sub>O e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (VASSILEV *et al.*, 2013).



De forma geral, o biocarvão é caracterizado, sobretudo, por ter uma composição rica em carbono, com alto grau de aromaticidade (TRAZZI *et al.* 2018). A celulose e, sobretudo, a lignina podem contribuir, por meio da sua carbonização, no aumento do conteúdo de cinzas, além do teor de carbono do biocarvão (CYBULAK; SOKOŁOWSKA; BOGUTA, 2021).

Entretanto biochars provenientes de esterco animal possuem teores de carbono aromático menores, comparativamente aos materiais vegetais, haja vista o fato de aqueles apresentarem compostos orgânicos que se perdem mais facilmente, antes da formação de compostos mais estáveis, em temperaturas mais elevadas (DOMINGUES *et al.* 2017). A concentração do carbono total do BEB foi de 167,9 g kg<sup>-1</sup> (TABELA 2). De Souza *et al.* (2021) encontraram 514,40 g kg<sup>-1</sup> para o biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar, em função de ser um resíduo lignocelulósico rico em carbono.

Dos Santos *et al.* (2019) verificaram aumento do teor de carbono com a diminuição do teor de hidrogênio, em função do aumento da temperatura de pirólise para a produção de biochar de serragem de madeira e de bagaço de cana-de-açúcar. Esse fenômeno foi associado à aromatização atingida pelos materiais, durante a pirólise, uma vez que se tem uma diminuição da relação H/C do biochar.

O valor de N total apresentado pelo biochar, utilizado neste trabalho (TABELA 2), é considerado baixo e foi semelhante ao encontrado por Sarfaraz *et al.* (2020). De acordo com esses autores, o baixo teor de N pode ser atribuído à alta temperatura de pirólise, bem como à queima de material orgânico, resultando na perda de nitrogênio por volatilização, nas formas de amônia – NH<sub>3</sub>, óxido nitroso – N<sub>2</sub>O e dióxido de nitrogênio – NO<sub>2</sub>. De acordo com Song e Guo (2012), em se tratando de conservação do conteúdo de N, os biochars produzidos a partir de esterco animal deveriam ser pirolisados a uma temperatura abaixo de 300 °C. No processo de degradação térmica dos resíduos orgânicos, de modo geral, a hemicelulose se decompõe em uma faixa de temperatura de 220 a 315 °C. De outro modo, a celulose se degrada de 315 a 400 °C, enquanto a lignina, componente mais resistente termicamente da biomassa, em função da sua estrutura aromática altamente condensada, que é difícil de romper-se, decompõe-se em uma faixa mais ampla de temperatura, de 150 a 900 °C (POLETTO, 2017; PROTÁSIO *et al.*, 2021; WATERS *et al.*, 2017).

Cantrell *et al.* (2012), trabalhando com cinco tipos de esterco de animais e temperaturas de 350 e 700 °C, verificaram aumento no teor de macronutrientes com a elevação da temperatura de pirólise. Comportamento semelhante também foi observado por De Souza *et al.* (2021), estudando biocarvões produzidos a partir de biossólido e bagaço de cana-de-açúcar.

O conteúdo de nutrientes de um determinado biochar varia segundo as características da matéria-prima utilizada. Durante a carbonização, o teor de P tende a aumentar, contudo dá-se pela formação de um P mais estável, de liberação lenta (DAI *et al.*, 2016). O teor de P neste estudo foi de 32,67 g kg<sup>-1</sup> (TABELA 2), valor maior que o encontrado por Gunes *et al.* (2014), os quais, trabalhando com biochar de esterco de frango produzido a 300 °C, obtiveram um teor de 19,0 g kg<sup>-1</sup> de P.

O teor de K no BEB foi de 5,40 g kg<sup>-1</sup> (TABELA 2), menor que ao encontrado por Cantrell *et al.* (2012) e Gunamantha e Widana (2018), 14,4 e 21,26 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, utilizando-se como matéria-prima o esterco bovino. Essa diferença pode estar relacionada à composição inicial de nutrientes da matéria-prima, bem como às condições de pirólise utilizadas. Em relação aos teores de Ca e Mg do BEB (TABELA 2), ambos se encontraram próximos aos teores observados por Cantrell *et al.* (2012), nas temperaturas de 350 e 700 °C, respectivamente.

Em suma, em relação aos macronutrientes, com a finalidade de se diminuir as perdas de N, temperaturas relativamente mais baixas devem ser utilizadas, por volta de 300 °C. Em contraposição, temperaturas mais elevadas, em torno de 700 °C, proporcionam maiores teores de P e K (KARIM *et al.*, 2021). Esses comportamentos levam em consideração a temperatura de volatilização de cada elemento específico e a sua concentração, tendo em vista que a temperatura de pirólise e a duração do período de aquecimento influenciam nas propriedades químicas do biochar (KNICKER, 2007; LEHMANN e JOSEPH, 2009).

Os teores de micronutrientes tendem a apresentar altas concentrações no biochar, sobretudo, em se tratando daqueles produzidos a partir de esterco animal, dado a perda de massa, por meio das altas temperaturas (SARFARAZ *et al.*, 2020), ou seja, por efeito de concentração.

Tabela 2 – Caracterização do biochar de esterco bovino (BEB).

| Características                                 | Teores |
|---|--------|
| pH  | 9,8    |
| Condutividade Elétrica ( $\mu\text{Scm}^{-1}$ ) | 411    |
| Cinzas (%)                                      | 36,2   |
| Carbono Total ( $\text{g kg}^{-1}$ )            | 167,9  |
| Nitrogênio Total ( $\text{g kg}^{-1}$ )         | 6,43   |
| P ( $\text{g kg}^{-1}$ )                        | 32,67  |
| K ( $\text{g kg}^{-1}$ )                        | 5,40   |
| Ca ( $\text{g kg}^{-1}$ )                       | 19,33  |
| Mg ( $\text{g kg}^{-1}$ )                       | 23,22  |
| Na ( $\text{g kg}^{-1}$ )                       | 1,08   |
| S ( $\text{g kg}^{-1}$ )                        | 0,70   |
| Fe ( $\text{mg kg}^{-1}$ )                      | 375,3  |
| Zn ( $\text{mg kg}^{-1}$ )                      | 100,4  |
| Mn ( $\text{mg kg}^{-1}$ )                      | 82,08  |
| Cu ( $\text{mg kg}^{-1}$ )                      | 15,28  |
| B ( $\text{mg kg}^{-1}$ )                       | 6,64   |

Fonte: Do autor, 2022.

## 5.2 Propriedades químicas do solo

No que se refere ao pH, verificou-se que a aplicação do biochar, seja na forma peletizada, ou não peletizada, independentemente da calagem e fertilização, reduziu a acidez do solo, sendo, nesses tratamentos, obtidos maiores valores de pH em relação ao tratamento controle (TABELA 3). A elevação do pH, em função da utilização do biochar, ocorre pela ampla presença de cátions básicos (como  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  e  $\text{K}^{+}$ ) nas cinzas, nas formas de óxidos e hidróxidos de metais alcalinos, provenientes do processo de pirólise (ALI *et al.*, 2017; DA SILVA *et al.*, 2017a; MOHAMED *et al.*, 2018).

É importante ressaltar que o emprego da calagem incrementou significativamente o valor do pH, de maneira a atingir a neutralidade, independentemente da peletização do biochar (TABELA 3). Fato é que, assim como o calcário, o biocarvão contribui para o aumento do pH do solo, demonstrando ser uma forma alternativa na mitigação da acidez e da toxidez por  $Al^{+3}$  do solo (AGUIAR, 1998; YAO *et al.*, 2019). Apesar disso, faz-se necessário atentar-se à faixa ideal de pH, de acordo com a cultura em uso, haja vista a disponibilidade dos nutrientes no solo (SEDIYAMA; SILVA; BORÉM, 2015), em especial, quando se trata da combinação do biochar e calcário (LEHMANN; JOSEPH, 2009; YAO *et al.*, 2019). Os elementos químicos, como os micronutrientes que estão na forma catiônica na solução do solo (Fe, Mn, Zn, Cu e Ni), podem formar precipitados em pH próximo ao neutro (BRTNICKY *et al.*, 2021).

Os teores de P disponível, nos tratamentos relacionados à aplicação do biochar, na forma peletizada ou não peletizada, apresentaram-se superiores, ante o tratamento controle (TABELA 3). Isso acontece, em razão da presença de P no biochar, levando-se em conta que esse nutriente não é volatilizado até temperaturas de pirólise de, aproximadamente, 700 °C (WANG *et al.*, 2012). Soma-se a isso, conforme Jiang *et al.* (2015), o fato do biochar dispor de cargas negativas – provenientes de grupos funcionais aniônicos, que reduzem a adsorção dos fosfatos nas cargas elétricas positivas das argilas. Deve-se considerar o aumento do pH do solo, tendo em vista a limitação da formação de fosfatos Al e Fe (LEHMANN; JOSEPH, 2009). Além disso, a sílica solúvel presente no biochar compete pelos sítios de fixação de fósforo (TORRES *et al.*, 2021).

O uso de biochar peletizado, em associação à adubação PK, com ou sem calagem, propiciou os maiores teores de P no solo, com, respectivamente, 420,3 e 401,3 mg kg<sup>-1</sup> (TABELA 3). No solo que recebeu a aplicação de biochar não peletizado com fertilizante PK, os teores de P corresponderam a 81,4 e 74,6 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente, com e sem calagem. Consoante a Sousa e Lobato (2004), esses valores são considerados altos.

Para o caso dos solos do cerrado, que são qualificados como sendo de baixa disponibilidade de P, razão pela qual as culturas têm a sua produtividade limitada e os adubos fosfatados sejam, em consequência, os mais demandados, o complemento de P aplicado ao solo torna-se de grande valia (MALAVOLTA, 1980; DA SILVA *et al.*, 2017a). Nesses solos mais intemperizados, os quais são abundantes em caulinita e óxidos de Fe e Al, o P inorgânico compõe a fração não lábil do solo, isto é, esse nutriente não se encontra em equilíbrio imediato com o P em solução, pelo fato de ser adsorvido às partículas do solo, ou por formar compostos de baixa solubilidade de Fe e Al (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Observou-se que a peletização do biochar, especialmente com a fertilização de P, contribuiu para o aumento significativo nos teores de P disponível no solo, em comparação ao tratamento correspondente ao biochar não peletizado (207,9 e 41,3 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente) (TABELA 3). A maior liberação do nutriente pelo pellet enriquecido com fertilizante pode ser atribuída, de acordo com Kim, Hensley e Labbé (2014), à temperatura de processamento dos pellets na etapa de peletização, à proporção de aglutinante utilizada, bem como à quantidade do nutriente proveniente da fertilização. Quanto menor a temperatura e a proporção de aglutinante, maior será a taxa de liberação de nutrientes, em razão da formação de tamanhos de poros maiores e o aumento do volume total de poros.

De outro lado, buscando-se a manutenção do nutriente por um período maior nos pellets, com liberação lenta e gradual no solo, a peletização deve ser realizada em altas temperaturas, de acordo com o ligante utilizado, por meio das quais o tamanho e o volume total dos poros serão menores, em função da despolimerização do ligante que gerará maior força atrativa entre as partículas (REZA *et al.*, 2012; MOHAMMADI, 2021). Nesse sentido, maiores temperaturas de pirólise podem tornar a liberação dos minerais mais gradativa, tendo em vista que a porosidade do biochar funciona como barreira física para os nutrientes (ROMBEL; KRASUCKA; OLESZCZUK, 2021). Alia-se a dependência da capacidade de liberação de nutrientes à matéria-prima utilizada e às condições de produção do biochar (AHMAD *et al.*, 2014).

A liberação gradativa do P ao solo também pode ser justificada pela sua associação com o MgO presente no biochar. O BEB possui quantidade considerável desse elemento em sua composição (TABELA 2). Nessa perspectiva, o MgO pode capturar os íons fosfato, formando precipitados em superfície, sendo a taxa de dissolução das moléculas o fator determinante para a disponibilidade do nutriente às plantas (LUO *et al.*, 2021). Ademais, vale salientar que o grupo  $MgOH^+$  pode agir como ponto ativo para adsorção do  $HPO_4^{2-}$  ou  $H_2PO_4^-$  por interação eletrostática (LI *et al.*, 2016).

A utilização de pellets do biochar enriquecidos com fertilizante propiciou a obtenção de maiores teores de K trocável no solo, seja com ou sem correção, correspondendo a 376,4 e 410,7 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente (TABELA 3). Os teores obtidos nesses tratamentos foram classificados como altos, de acordo com Sousa e Lobato (2004).

Semelhantemente ao verificado para o P, os maiores teores foram obtidos nos tratamentos com biochar e fertilizante PK (TABELA 3). Vários autores verificaram aumento nos teores de K trocável no solo, quando aplicaram biochar com fertilizante mineral, contribuindo, assim, para maior eficiência dos adubos potássicos (ORAM *et al.*, 2014; WIDOWATI; ASNAH, 2014). Em relação à peletização, verificaram-se maiores teores médios de K, nos tratamentos com biochar peletizado, correspondendo a 203,9 e 21,4 mg dm<sup>-3</sup>, com e sem peletização, respectivamente (TABELA 3). A peletização do biochar propicia a formação de partículas menores, as quais podem tornar o nutriente mais acessível. Somam-se a esse fenômeno os fatores de produção dos pellets, os quais foram abordados anteriormente, como: temperatura, quantidade de nutrientes e do aglutinante utilizado no processo (DÜNISCH *et al.*, 2007; KIM; HENSLEY; LABBÉ, 2014).

Meena e Prakasha (2020) verificaram que a aplicação combinada de biochar e calcário aumentou a disponibilidade de K. De acordo com os autores, o aumento de Ca, na fase líquida do solo (solução), bem como na fase sólida, por meio da calagem, ocasionou o deslocamento do K adsorvido na fase sólida do solo para a solução. Nesse contexto de aumento de K na solução do solo, sujeito a perdas por lixiviação, o biochar pode adsorver e liberar lentamente o K para a fase líquida, em função da sua porosidade e cargas elétricas negativas de superfície (KIM; HENSLEY; LABBÉ, 2014; NGUYEN *et al.*, 2020).

No que diz respeito aos teores de Ca, o tratamento controle apresentou-se inferior em relação aos demais tratamentos. Nota-se, dessa forma, que o biochar contribui para o incremento de Ca no solo. Ademais, a realização da calagem elevou os teores de Ca, significativamente, em comparação aos tratamentos sem a calagem, independentemente da peletização do biochar (TABELA 3). Do mesmo modo, a calagem contribuiu, de forma significativa, para os teores de Mg, independentemente da peletização e da fertilização PK (TABELA 3).

A aplicação combinada de calcário e biochar aumentou os teores de Ca e Mg no solo (TABELA 3), levando-se em conta que ambos possuem Ca e Mg em sua composição (TABELA 2). De igual modo, outros autores verificaram que a aplicação combinada de calcário e biochar elevaram os teores de Ca e Mg dos solos (RABILEH *et al.*, 2015; MOSHARROF *et al.*, 2021).

A cinza proveniente da pirólise de biomassa é rica em óxidos e hidróxidos de Ca, Mg e K, como discutido anteriormente que, além de contribuírem para o aumento do pH do solo, elevam os tores de bases trocáveis ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  e  $\text{K}^{+}$ ), que influenciam no crescimento e desenvolvimento das culturas (WOICIECHOWSKI *et al.*, 2018).

Vale considerar que a elevação desequilibrada dos teores de bases trocáveis, pela interação existente entre os íons  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  e  $\text{K}^{+}$ , pode causar reações de inibição competitiva entre esses nutrientes – isto é, competem pelo mesmo sítio de absorção do carregador atrelado à membrana celular das plantas (MALAVOLTA, 1980). Com isso, o excesso de um nutriente interfere na absorção de outro pela planta, de tal sorte que as relações Ca/Mg, Ca/K e Mg/K devam ser constantemente observadas.

Nesse sentido, Sigua *et al.* (2016), trabalhando com biochar de esterco de aves com alta dose de aplicação ( $40 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), observaram diminuição na produção de biomassa e na absorção de nutrientes pelo trigo resultante do aumento da CE e do pH do solo em 1032 e 62%, respectivamente, em relação ao tratamento controle. Tal conjuntura pode ser atribuída ao aumento do potencial osmótico do solo, assim como à competição entre os nutrientes – ou seja, antagonismo.

Da mesma forma, Widowati e Asnah (2014) identificaram redução na absorção de K, nas folhas e caules das plantas de milho, bem como na biomassa seca, em doses elevadas de potássio ( $100$  a  $200 \text{ kg ha}^{-1}$ ) em combinação com biochar de resíduos vegetais. Tais resultados, segundo os autores, podem estar associados ao desequilíbrio de nutrientes, em detrimento da elevação dos teores de K, que causou diminuição da absorção de Ca e Mg pelas plantas.

Tabela 3 – pH, fósforo Mehlich (P), potássio trocável (K), cálcio trocável (Ca) e magnésio trocável (Mg) do solo incubado com biochar de esterco bovino não peletizado e peletizado, sem e com a aplicação de corretivo da acidez, sem e com a aplicação de fertilizante.

| Tratamento     |            | pH      | P                   | K                   | Ca                     | Mg                     |         |         |
|----------------|------------|---------|---------------------|---------------------|------------------------|------------------------|---------|---------|
|                |            | -       | mg kg <sup>-1</sup> | mg kg <sup>-1</sup> | cmolc dm <sup>-3</sup> | cmolc dm <sup>-3</sup> |         |         |
| Controle       |            | 5,6     | 1,3                 | 11,4                | 1,07                   | 0,44                   |         |         |
| Não Peletizado | Sem Cal    | Sem Fer | 6,0 a*              | 3,4 b*              | 11,4 b                 | 1,47 a*                | 0,48 a  |         |
|                |            | Com Fer | 6,0 a*              | 74,6 a*             | 22,8 a*                | 1,69 a*                | 0,47 a  |         |
|                |            | Média   | 6,0 B               | 39,0 A              | 17,10 A                | 1,58 B                 | 0,38 B  |         |
|                | Com Cal    | Sem Fer | 7,0 a*              | 5,8 b*              | 22,8 a*                | 1,76 b*                | 0,54 b* |         |
|                |            | Com Fer | 7,0 a*              | 81,4 a*             | 28,5 a*                | 2,06 a*                | 0,82 a* |         |
|                |            | Média   | 7,0 A               | 43,6 A              | 25,7 A                 | 1,91 A                 | 0,68 A  |         |
|                |            | Média   | 6,5 C               | 41,3 D              | 21,4 D                 | 1,75 C                 | 0,53 C  |         |
|                | Peletizado | Sem Cal | Sem Fer             | 6,2 a*              | 4,9 b*                 | 11,4 b                 | 1,30 b* | 0,67 a* |
|                |            |         | Com Fer             | 6,6 a*              | 401,3 a*               | 410,7 a*               | 1,67 a* | 0,45 b  |
|                |            | Média   | 6,4 B               | 203,1 A             | 211,1 A                | 1,49 B                 | 0,56 B  |         |
| Com Cal        |            | Sem Fer | 7,1 a*              | 5,4 b*              | 17,1 b*                | 1,90 a*                | 0,74 a* |         |
|                |            | Com Fer | 7,0 a*              | 420,3 a*            | 376,4 a*               | 2,14 a*                | 0,65 a* |         |
|                |            | Média   | 7,0 A               | 212,9 A             | 196,75 A               | 2,02 A                 | 0,70 A  |         |
|                | Média      | 6,7 C   | 207,9 C             | 203,90 C            | 1,75 C                 | 0,63 C                 |         |         |

Médias com asteriscos (\*) diferem do controle pelo teste de Dunnett ( $p < 0,05$ ). Letras minúsculas nas colunas comparam os tratamentos com e sem fertilizante, dentro dos tratamentos sem e com calagem pelo teste de F ( $p < 0,05$ ). As letras maiúsculas “A” e “B” comparam os tratamentos sem e com calagem e as letras maiúsculas “C” e “D” comparam o biochar sem e com peletização pelo teste de F ( $p < 0,05$ ).

Fonte: Do autor, 2022.

No que se refere à acidez potencial trocável (Al trocável), não foi observado efeito significativo dos tratamentos, uma vez que, mesmo no tratamento controle, o alumínio trocável foi baixo (TABELA 4). O tratamento controle apresentou pH de 5,6 (TABELA 3), considerada acidez média (RIBEIRO; GUIMARÃES; ÁLVAREZ, 1999). Segundo Aguiar (1998), quando o pH do solo ultrapassa o valor de 5,5, não se tem mais  $Al^{+3}$  em solução em níveis consideráveis tóxicos para as plantas. Nessa situação, o  $Al^{+3}$  presente na solução do solo precipita-se na forma de  $Al(OH)_3$ , tornando-se indisponível às plantas (SHETTY; PRAKASH, 2020).

Consoante Ribeiro, Guimarães e Álvarez (1999), são considerados níveis altos de acidez trocável (ou nociva) acima de  $1,01 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . O teor apresentado pelo tratamento controle foi de  $0,05 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , ou seja, uma concentração muito baixa (TABELA 4). Em solos ácidos, como os solos do cerrado, o teor de Al é considerado um fator restritivo para o crescimento e desenvolvimento das culturas. Entre os problemas gerados às plantas pelo excesso de  $Al^{+3}$  no solo estão: a inibição do alongamento radicular, a limitação da replicação de DNA e o desequilíbrio de nutrientes (SINGH *et al.*, 2017).

A correção de solos ácidos, por meio da calagem, tem sido o procedimento predominante na agricultura. Entretanto o emprego do biochar como corretivo do solo tem obtido consideração, em virtude de neutralizar a acidez, ampliar a retenção de água do solo, além de promover o sequestro de C por um extenso período – reduzindo a emissão de gases do efeito estufa, como o  $CO_2$ , para a atmosfera (LEHMANN *et al.*, 2011).

Em relação à acidez potencial, isto é, a soma dos íons hidrogênio ligados às cargas elétricas das argilas (acidez não trocável) com os íons alumínio (acidez trocável), os tratamentos com aplicação de fertilizante, sem a calagem, independentemente da peletização do biochar, apresentaram valores superiores ao tratamento controle (TABELA 4). A fertilização contribuiu para a acidificação do solo, entretanto fertilizantes fosfatados, principalmente, aqueles que não possuem teor de N em sua composição, a exemplo do  $KH_2PO_4$ , não possuem efeito de longa duração no pH do solo (VAN RAIJ, 1991; GOULDING, 2016). Apesar disso, os valores de acidez potencial são considerados baixos (RIBEIRO; GUIMARÃES; ÁLVAREZ, 1999).

Ao avaliar a CTC do solo, verificou-se efeito significativo da peletização em relação aos tratamentos não peletizados, sendo  $3,94$  e  $3,34 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , respectivamente (TABELA 4). Somado a isso, respostas superiores foram obtidas com a realização da calagem em combinação com o enriquecimento do biochar ( $4,77 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), correspondendo a um aumento de 43,67% em relação à testemunha. Biochars não peletizados, aliados à não correção do solo, independentemente do enriquecimento do biochar, não se diferenciaram da testemunha (TABELA 4).

A peletização pode ter retardado a taxa de decomposição do biochar, mantendo maior número de sítios ativos à CTC do solo, em comparação ao biochar não peletizado. Além disso, o aumento no pH provoca o aumento na CTC de solos com cargas variáveis. Yao *et al.* (2019), ao estudarem a eficiência da interação de três doses de calcário (0, 0,75 e  $1,5 \text{ g kg}^{-1}$ ) e três doses de biochar de partes aéreas de *Solanum tuberosum* (0, 5 e  $10 \text{ g kg}^{-1}$ ), no crescimento de *Phaseolus calcutus*, em solos ácidos, verificaram que a incorporação conjunta de biochar e calcário aumentaram a biomassa de parte aérea, a absorção de nutrientes (N, P e K) e o número de nódulos radiculares de bactérias fixadoras de  $N_2$ , em relação à aplicação isolada de biochar ou calcário.

O aumento no pH do solo e das bases trocáveis pela aplicação do biochar aumentaram a CTC e a saturação por bases do solo (TABELA 4). Jha *et al.* (2016) também verificaram aumento da CTC do solo com a aplicação de biochar. De acordo com Lehmann e Joseph (2009), um dos efeitos positivos do aumento da CTC pelo biochar é a maior capacidade de retenção de nutrientes pelo solo, diminuindo assim as perdas por lixiviação. Além da adição de bases trocáveis, a elevada área superficial específica do biochar e a porosidade contribuem não somente para o aumento da CTC, mas também para a maior retenção de água (DUME; MOSISSA; NEBIYU, 2016).

Embora não avaliada no presente estudo, certamente a porosidade do biochar teve efeitos positivos para as plantas. Os macroporos do biochar favorecem a aeração, o crescimento das raízes e o fluxo de água no solo. Por outro lado, os microporos favorecem a retenção de água e nutrientes, em razão da área superficial (LEHMANN; JOSEPH, 2009; SPERATTI *et al.*, 2017). Temperaturas de pirólise mais elevadas favorecem a formação de microporos, visto que a temperatura ideal, para a produção de poros, varia de acordo com a natureza da biomassa, contudo valores entre 400 e 700 °C são os mais recomendados para a maioria das biomassas (LENG *et al.*, 2021).

Quanto à saturação por bases, observou-se aumento expressivo nos tratamentos com o biochar, em comparação à testemunha, com valores variando entre 70,91 e 78,65% (TABELA 4). Consoante Ribeiro, Guimarães e Álvarez (1999), esses valores são classificados como bom ou alto. Esses resultados são em função da adição de Ca e Mg pelo biochar mais o calcário e K pelo fertilizante mineral.

Torres *et al.* (2020), ao analisarem o potencial de quatro doses de biochar de casca de arroz e de esterco bovino (1, 2, 3 e 4% massa de biochar/volume de solo), nas propriedades químicas de um solo de Cerrado, observaram aumento na saturação por bases e na CTC, em especial, na aplicação do biochar de esterco bovino, mais rico em bases trocáveis.

Por outro lado, Woiciechowski *et al.* (2018), trabalhando com a aplicação de doses de biochars de madeiras de espécies nativas de Floresta Ombrófila (0, 10, 20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup>), com e sem adubação de base, constataram que a elevação do pH e das bases trocáveis, produzidas pela adição do biochar ao solo, não foram capazes de aumentar a CTC do solo, em comparação aos tratamentos testemunhas (sem biochar e sem e com adubação), em razão da diminuição significativa da acidez potencial.

Para o carbono orgânico do solo (COS), verificou-se que, independentemente da peletização do biochar e da aplicação do fertilizante PK, os tratamentos sem calagem apresentaram maiores teores de COS em comparação ao controle (TABELA 4). Desse modo, a utilização de biochar de esterco bovino, à despeito de sua peletização, sem a calagem, pode contribuir para o aumento do COS, dado que os biochars possuem alto teor de C em sua composição (NOVOTNY *et al.*, 2015).

Vale ressaltar que a calagem pode ter favorecido a mineralização do COS, com consequente perda de gás carbônico para a atmosfera. Resultados similares foram encontrados por Mosharrof *et al.* (2021), os quais constataram emissões significativas de CO<sub>2</sub> nos tratamentos com calagem e com biochar de casca de arroz ou de resíduos de dendê. De acordo com os autores, a calagem pode ter favorecido a mineralização do COS, resultando na liberação de gás carbônico.

Embora a calagem incremente o pH de solos ácidos, bem como a sua estrutura – em função, por exemplo, da ação cimentante do Ca<sup>+2</sup>, constata-se a redução do COS, posto que, com a elevação do pH, tem-se o aumento da atividade microbiana no solo e, conseqüentemente, da mineralização da matéria orgânica (PARADELO; VIRTO; CHENU, 2015; WANG *et al.*, 2016).



Por outro lado, assim como a calagem favorece os microrganismos do solo, também favorece o crescimento das plantas, que fixam gás carbono da atmosfera em seus tecidos. De acordo com Aye, Sale e Tang (2016), esses comportamentos opostos podem ser em função: de modificações no pH inicial do solo, da taxa de aplicação da calagem, do tipo de solo, das condições climáticas, do período para a amostragem do solo posteriormente à calagem, entre outros fatores.

Tabela 4 – Acidez trocável (Al), acidez potencial (H+Al), CTC potencial (T), saturação por bases (V) e carbono orgânico no solo (COS) do solo incubado com biochar de esterco bovino não peletizado e peletizado, sem e com a aplicação de corretivo da acidez, sem e com a aplicação de fertilizante.

| Tratamento     |            |         | Al                                 | H+Al                               | T                                  | V        | COS                  |         |
|----------------|------------|---------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------|----------------------|---------|
|                |            |         | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | %        | dag kg <sup>-1</sup> |         |
| Controle       |            |         | 0,05                               | 1,03                               | 3,32                               | 58,49    | 0,49                 |         |
| Não Peletizado | Sem Cal    | Sem Fer | 0                                  | 1,07 b                             | 3,05 b                             | 65,00 a  | 0,69 a*              |         |
|                |            | Com Fer | 0                                  | 1,36 a*                            | 3,38 a                             | 59,73 a  | 0,55 a*              |         |
|                |            | Média   | 0                                  | 1,22 A                             | 3,22 A                             | 62,37 A  | 0,62 A               |         |
|                | Com Cal    | Sem Fer | 0                                  | 0,76 a*                            | 3,11 b                             | 75,74 a* | 0,49 a               |         |
|                |            | Com Fer | 0                                  | 0,87 a                             | 3,83 a*                            | 77,19 a* | 0,49 a               |         |
|                |            | Média   | 0                                  | 0,82 B                             | 3,47 A                             | 76,47 A  | 0,49 B               |         |
|                | Média      |         |                                    | 0                                  | 1,02 C                             | 3,34 D   | 69,42 C              | 0,56 C  |
|                | Peletizado | Sem Cal | Sem Fer                            | 0                                  | 1,04 b                             | 3,04 b*  | 65,73 a              | 0,62 a* |
|                |            |         | Com Fer                            | 0                                  | 1,30 a*                            | 4,47 a*  | 70,91 a*             | 0,62 a* |
|                |            |         | Média                              | 0                                  | 1,17 A                             | 3,76 B   | 68,32 A              | 0,62 A  |
| Com Cal        |            | Sem Fer | 0                                  | 0,79 b*                            | 3,47 b                             | 77,27 a* | 0,55 a               |         |
|                |            | Com Fer | 0                                  | 1,02 a                             | 4,77 a*                            | 78,65 a* | 0,55 a               |         |
|                |            | Média   | 0                                  | 0,91 A                             | 4,12 A                             | 77,96 A  | 0,55 A               |         |
| Média          |            |         | 0                                  | 1,04 C                             | 3,94 C                             | 73,14 C  | 0,59 C               |         |

Médias com asteriscos (\*) diferem do controle pelo teste de Dunnett ( $p < 0,05$ ). Letras minúsculas nas colunas comparam os tratamentos com e sem fertilizante, dentro dos tratamentos sem e com calagem pelo teste de F ( $p < 0,05$ ). As letras maiúsculas "A" e "B" comparam os tratamentos sem e com calagem e as letras maiúsculas "C" e "D" comparam o biochar sem e com peletização pelo teste de F ( $p < 0,05$ ).

Fonte: Do autor, 2022.

### 5.3 Crescimento e nutrição mineral de *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás

No primeiro ciclo de cultivo (primeiro corte), aos 41 dias após a semeadura, verificou-se que o crescimento do capim no tratamento controle foi limitado, em comparação aos demais tratamentos e não atingiu a altura de corte de 40 cm. Além disso, nos demais cortes, verificou-se menor produção de BSPA, no tratamento controle, comparado aos demais tratamentos, em razão da baixa disponibilidade de nutrientes no solo (TABELA 5).

De acordo com esses resultados, verifica-se a vantagem da aplicação do biochar, mesmo que de maneira isolada, isto é, independentemente da sua peletização, calagem e fertilização mineral, em comparação ao tratamento controle, tendo em vista que o emprego isolado do biochar possibilitou o aumento do pH do solo, bem como da disponibilidade de nutrientes. Bista *et al.* (2019) verificaram incrementos de 15 a 20% na BSPA do trigo (*Triticum* sp.), quando na aplicação isolada de biochar de madeira, em função, segundo os autores, da correção da acidez e fornecimento de nutrientes pelo biochar.

No primeiro corte, os maiores valores de BSPA foram obtidos nos tratamentos com biochar não peletizado, sendo a produção maior em 18,28%, em relação ao biochar peletizado. A produção média de BSPA foi de 2,20 e 1,86 g/vaso, respectivamente, nos tratamentos com biochar sem e com peletização. Por outro lado, os tratamentos com o biochar peletizado apresentaram elevações de 46,77 e 70,97%, no segundo e terceiro cortes do capim, respectivamente, em relação à BSPA do primeiro corte, sendo, no terceiro corte, a resposta significativamente maior, em comparação ao biochar não peletizado, em 19,55% (TABELA 5). Esses resultados indicam que a liberação de nutrientes pelo biochar peletizado foi mais lenta em comparação ao não peletizado.

Nessa mesma direção, apesar dos tratamentos com o biochar não peletizado terem apresentado maior rendimento no primeiro ciclo de cultivo, verificou-se maior produção acumulada, isto é, BSPAT, para os tratamentos com o biochar peletizado, principalmente, quando enriquecidos com PK, mais a calagem (TABELA 5). Diferentemente dos adubos comerciais, os fertilizantes peletizados à base de biochar caracterizam-se por uma liberação lenta e controlada dos nutrientes no solo, o que possibilita maior aproveitamento das plantas em longo prazo. A peletização do biochar, aliada à adição de aglutinantes, influencia na cinética de liberação dos nutrientes, bem como na diminuição da taxa de dissolução em água (ROMBEL; KRASUCKA; OLESZCZUK, 2021).

Os grupos funcionais na superfície do biochar são capazes de adsorver diversos íons nutrientes, como  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ , entre outros. O principal mecanismo envolvido na adsorção desses íons é a quimissorção, que consiste no compartilhamento de elétrons entre adsorvente e adsorvato (FÁTIMA *et al.*, 2021; ROMBEL; KRASUCKA; OLESZCZUK, 2021; SIM *et al.*, 2021).

A alteração na dinâmica de liberação de nutrientes pela peletização do biochar enriquecido com PK é desejável, uma vez que pode evitar perdas de potássio do fertilizante mineral por lixiviação e diminuir a fixação de fósforo, principalmente em solos muito intemperizados, de baixa CTC, ácidos e ricos em caulinita e óxidos de Fe e Al (LUSTOSA FILHO *et al.*, 2017).

Soma-se a isso que o percentual de liberação de nutrientes pelos pellets de biochar se dá vinculado a uma série de fatores, entre os quais, a proporção de aglutinante utilizado e a temperatura envolvida na fase de peletização, bem como ao tamanho das partículas do biocarvão. Kim, Hensley e Labbé (2014) verificaram duas fases de liberação de K e P pelos pellets de biochar, sendo a primeira marcada por uma

liberação mais rápida dos nutrientes, contudo, por um curto período; e a segunda caracterizada pela liberação mais lenta, mas por um período mais longo.

Outro benefício associado à peletização é evitar os efeitos dos finos do material pirolisado. Por causa do pequeno tamanho das partículas de baixa densidade, durante a aplicação ao solo, ocorrem perdas de biochar por deriva e intoxicação dos aplicadores por inalação, uma vez que há um grande número de compostos tóxicos nos finos de biochars (LI; BAIR; PARIKH, 2018).

Independentemente da peletização do biochar e da aplicação de PK, de modo geral, os maiores valores de BSPA foram obtidos nos tratamentos com calagem. Da mesma forma, os maiores valores de BSPA foram obtidos nos tratamentos com aplicação de PK, independentemente da peletização ou da calagem (TABELA 5). Vários estudos apontaram para a pertinência da aplicação combinada de biochar com corretivos da acidez do solo e com fertilizantes minerais (HALE *et al.*, 2020; MOSHARROF *et al.*, 2021; YAO *et al.*, 2019), uma vez que, isoladamente, precisaria de uma quantidade elevada de biochar, para ter os mesmos efeitos da calagem e dos fertilizantes minerais, o que tornaria inviável o uso do material carbonizado em grandes áreas de cultivos agrícolas (MAROUŠEK *et al.*, 2017; MUKHERJEE; LAL, 2016).

De acordo com os resultados obtidos, o capim respondeu à correção dos fatores de acidez do solo e à adição de nutrientes. Lustosa Filho *et al.* (2020), estudando a eficiência do uso de P pelo capim Marandu (*U. brizantha* cv. Marandu), por meio de fertilizantes à base de biochar, verificaram maiores rendimentos de BSPA, principalmente no segundo e terceiro ciclos de crescimento, em função da liberação gradual do nutriente. Em contrapartida, os fertilizantes altamente solúveis, como o superfosfato triplo, apresentaram maior rendimento apenas no primeiro ciclo de cultivo, dada a elevada disponibilidade de P preliminarmente, sendo a parte não absorvida pela planta suscetível à fixação em óxidos do solo.

Em relação aos cortes, embora não tenha sido realizada análise estatística, verificou-se uma redução na BSPA do capim, principalmente nos dois últimos cortes, o que pode estar relacionada à menor disponibilidade de nutrientes no solo, dada as extrações sucessivas ao longo dos cultivos.

Quanto ao sistema radicular, verificaram-se maiores valores de BSRA, nos tratamentos com biochar não peletizado, com aumento de 28,80% em relação aos tratamentos com biochar peletizado (TABELA 5). Outros autores também têm verificado efeito do biochar no sistema radicular, principalmente no aumento do número de raízes finas, que, por consequência, propicia a eficiência de absorção de nutrientes (DA SILVA *et al.*, 2017b; TORRES *et al.*, 2021; ZELAYA *et al.*, 2019) (FIGURA 7).

Figura 7 – Representação do contato da raiz do capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás com o biochar peletizado.



Fonte: Do autor, 2022.

Tabela 5 – Biomassa seca de parte aérea (BSPA), nos cinco ciclos de cultivo (cortes), biomassa seca de parte aérea total (BSPAT) e biomassa seca radicular (BSRA) do capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás, considerando o solo incubado com biochar de esterco bovino não peletizado e peletizado, sem e com a aplicação de corretivo da acidez, sem e com a aplicação de fertilizante.

| Tratamento     |            | 1º Corte | 2º Corte | 3º Corte | 4º Corte | 5º Corte | BSPAT   | BSRA     |          |         |
|----------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|
|                |            | g/vaso   |          |          |          |          |         |          |          |         |
| Controle       |            | 0,00     | 0,49     | 0,48     | 0,22     | 0,08     | 1,27    | 0,71     |          |         |
| Não peletizado | Sem Cal    | Sem Fer  | 1,91 b*  | 2,07 b*  | 1,79 b*  | 0,89 b*  | 0,58 b* | 7,24 b*  | 2,65 b*  |         |
|                |            | Com Fer  | 2,31 a*  | 3,07 a*  | 2,82 a*  | 2,09 a*  | 1,81 a* | 12,10 a* | 3,37 a*  |         |
|                |            | Média    | 2,11 A   | 2,57 A   | 2,31 B   | 1,49 B   | 1,19 B  | 9,67 B   | 3,01 B   |         |
|                | Com Cal    | Sem Fer  | 1,86 b*  | 2,04 b*  | 2,36 b*  | 1,53 b*  | 1,04 b* | 8,83 b*  | 3,51 a*  |         |
|                |            | Com Fer  | 2,72 a*  | 2,81 a*  | 3,66 a*  | 2,38 a*  | 1,69 a* | 13,26 a* | 3,33 a*  |         |
|                |            | Média    | 2,29 A   | 2,43 A   | 3,01 A   | 1,96 A   | 1,37 A  | 11,06 A  | 3,42 A   |         |
|                |            | Média    | 2,20 C   | 2,50 C   | 2,66 D   | 1,72 C   | 1,28 C  | 10,36 D  | 3,22 C   |         |
|                | Peletizado | Sem Cal  | Sem Fer  | 1,63 a*  | 2,44 b*  | 2,74 b*  | 1,23 b* | 0,60 b*  | 8,64 b*  | 2,04 b* |
|                |            |          | Com Fer  | 1,25 a*  | 2,82 a*  | 3,23 a*  | 2,70 a* | 1,44 a*  | 11,44 a* | 2,53 a* |
|                |            | Média    | 1,44 B   | 2,63 A   | 2,99 B   | 1,97 A   | 1,02 B  | 10,05 B  | 2,29 B   |         |
| Com Cal        |            | Sem Fer  | 1,86 b*  | 2,56 b*  | 2,87 b*  | 1,18 b*  | 0,78 b* | 9,25 b*  | 2,67 a*  |         |
|                |            | Com Fer  | 2,68 a*  | 3,09 a*  | 3,89 a*  | 2,82 a*  | 1,98 a* | 14,46 a* | 2,76 a*  |         |
|                |            | Média    | 2,27 A   | 2,83 A   | 3,38 A   | 2,00 A   | 1,38 A  | 11,86 A  | 2,71 A   |         |
|                | Média      | 1,86 D   | 2,73 C   | 3,18 C   | 1,98 C   | 1,20 C   | 10,95 C | 2,50 D   |          |         |

Médias com asteriscos (\*) diferem do controle pelo teste de Dunnett ( $p < 0,05$ ). Letras minúsculas nas colunas comparam os tratamentos com e sem fertilizante, dentro dos tratamentos sem e com calagem pelo teste de F ( $p < 0,05$ ). As letras maiúsculas “A” e “B” comparam os tratamentos sem e com calagem e as letras maiúsculas “C” e “D” comparam o biochar sem e com peletização pelo teste de F ( $p < 0,05$ ).

Fonte: Do autor, 2022.

Os acúmulos de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) na parte aérea, considerando a média dos cinco cortes, foi significativamente menor no tratamento controle. Não houve diferença entre os tratamentos sem e com peletização do biochar. Num outro sentido, os maiores acúmulos foram observados nos tratamentos com calagem e com aplicação de P e K via fertilizante mineral (TABELA 6), em função da maior disponibilidade de nutrientes e maior produção de biomassa nesses tratamentos, como discutido anteriormente.

Importante destacar que o BEB possuía baixos teores de K (TABELA 2), o que poderia ser um problema nos tratamentos sem a aplicação de fertilizante mineral, em função da calagem, que eleva os teores de Ca e Mg do solo. Nesse caso, poderia haver uma diminuição da absorção de K, em razão das elevadas relações Ca/K e Ca/Mg do solo, ou seja, inibição competitiva (MALAVOLTA; VITTI; DE OLIVEIRA, 1997). No entanto o deslocamento do K adsorvido na fase sólida do solo, com consequente adsorção nas partículas de biochar, assim como a adsorção de Ca e Mg, pode ter favorecido uma liberação gradual desses nutrientes para as plantas, no decorrer dos ciclos de cultivo, evitando, dessa forma, a competição no processo de absorção iônica radicular.

Essa hipótese pode ser corroborada com o aumento do acúmulo de K pelas plantas nos tratamentos com calagem (TABELA 6). Meena e Prakasha (2020) também verificaram maior acúmulo de K pelas plantas, nos tratamentos com biochar e calcário, pela liberação mais lenta desses elementos adsorvidos às partículas do biochar. Além disso, a calagem pode ter contribuído ao aumento da taxa de mineralização do biochar, associada à maior decomposição da matéria orgânica, em função da ativação de microrganismos decompositores, com o aumento do pH e o emprego de nutrientes (THAPA *et al.*, 2021).

Em relação ao enxofre, o biochar foi uma fonte importante desse elemento (TABELA 6). Nesse sentido, a temperatura de pirólise é muito importante na manutenção dos teores desse elemento. De acordo com Zhao *et al.* (2018), o aumento da temperatura de pirólise diminui o teor de S do biochar de palha de milho, em razão da perda do elemento, por meio de compostos voláteis, tendo em consideração que o biochar produzido em temperaturas menores, por volta de 300 a 500 °C, possuía mais  $SO_4^{2-}$  disponível às plantas que aquele produzido em temperaturas maiores, isto é, 700 °C.

Para os micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn) acumulados na parte aérea do capim, não houve diferenças entre os tratamentos sem ou com peletização do biochar e sem e com calagem. Por outro lado, os maiores valores foram obtidos nos tratamentos com aplicação de PK (TABELA 7), em função da maior produção de biomassa de capim, como discutido anteriormente.

Os micronutrientes são exigidos em menores quantidades que os macronutrientes, sendo o biochar uma importante fonte desses elementos. De outro modo, dependendo da quantidade de biochar aplicada, os micronutrientes podem ficar fortemente adsorvidos às partículas de biochar, reduzindo, com isso, a sua biodisponibilidade.

Alguns biochars são considerados fortes adsorventes desses elementos por sua alta aromaticidade, área superficial específica e capacidade de elevar o pH do solo e são utilizados para a remediação de solos contaminados por metais pesados (HE *et al.*, 2019).

É pertinente salientar que, como deve ter ocorrido no presente estudo, a adsorção dos micronutrientes nas partículas de biochar pode ter diminuído as suas reações de precipitações, em pH mais elevado e, ainda, contribuiu para a liberação gradual, ao longo dos ciclos de cultivo, à semelhança dos quelatos, comercializados como fertilizantes fontes de micronutrientes.

Tabela 6 – Acúmulo médio de macronutrientes, nos cinco ciclos de cultivo do capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás, considerando o solo incubado com biochar de esterco bovino não peletizado e peletizado, sem e com a aplicação de corretivo da acidez, sem e com a aplicação de fertilizante.

| Tratamento     |         | N                    | P        | K       | Ca       | Mg       | S       |         |
|----------------|---------|----------------------|----------|---------|----------|----------|---------|---------|
|                |         | ----- g/planta ----- |          |         |          |          |         |         |
| Controle       |         | 2,04                 | 0,08     | 1,28    | 0,42     | 0,20     | 0,13    |         |
| Não Peletizado | Sem Cal | Sem Fer              | 15,55 b* | 1,20 b* | 12,20 b* | 4,15 b*  | 2,20 b* | 1,95 b* |
|                |         | Com Fer              | 28,07 a* | 2,67 a* | 24,53 a* | 8,39 a*  | 3,49 a* | 3,04 a* |
|                | Média   |                      | 21,81 A  | 1,93 B  | 18,36 B  | 6,27 B   | 2,85 B  | 2,50 A  |
|                | Com Cal | Sem Fer              | 19,85 b* | 2,29 b* | 26,49 b* | 8,37 b*  | 5,16 b* | 2,30 b* |
|                |         | Com Fer              | 31,40 a* | 4,24 a* | 44,07 a* | 14,25 a* | 7,58 a* | 3,45 a* |
|                |         | Média                |          | 25,63 A | 3,26 A   | 35,28 A  | 11,31 A | 6,37 A  |
| Média          |         | 23,72 C              | 2,60 C   | 26,82 C | 8,79 C   | 4,61 C   | 2,69 C  |         |
| Peletizado     | Sem Cal | Sem Fer              | 20,21 b* | 2,24 b* | 17,58 b* | 4,73 b*  | 2,59 b* | 2,19 b* |
|                |         | Com Fer              | 28,26 a* | 3,19 a* | 30,69 a* | 7,71 a*  | 3,45 a* | 2,93 a* |
|                | Média   |                      | 24,24 A  | 2,71 B  | 24,13 B  | 6,22 B   | 3,02 B  | 2,56 B  |
|                | Com Cal | Sem Fer              | 21,42 b* | 2,68 b* | 27,61 b* | 8,52 b*  | 5,56 b* | 2,45 b* |
|                |         | Com Fer              | 34,33 a* | 4,61 a* | 50,34 a* | 15,68 a* | 7,72 a* | 3,57 a* |
|                |         | Média                |          | 27,88 A | 3,65 A   | 38,98 A  | 12,10 A | 6,64 A  |
| Média          |         | 26,06 C              | 3,18 C   | 31,55 C | 9,16 C   | 4,83 C   | 2,79 C  |         |

Médias com asteriscos (\*) diferem do controle pelo teste de Dunnett ( $p < 0,05$ ). Letras minúsculas nas colunas comparam os tratamentos com e sem fertilizante, dentro dos tratamentos sem e com calagem pelo teste de F ( $p < 0,05$ ). As letras maiúsculas “A” e “B” comparam os tratamentos sem e com calagem e as letras maiúsculas “C” e “D” comparam o biochar sem e com peletização pelo teste de F ( $p < 0,05$ ).

Fonte: Do autor, 2022.



Tabela 7 – Acúmulo médio de micronutrientes, nos cinco ciclos de cultivo do capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás, considerando o solo incubado com biochar de esterco bovino não peletizado e peletizado, sem e com a aplicação de corretivo da acidez, sem e com a aplicação de fertilizante.

| Tratamento     |         | B                     | Cu       | Fe       | Mn        | Zn        |          |
|----------------|---------|-----------------------|----------|----------|-----------|-----------|----------|
|                |         | ----- mg/planta ----- |          |          |           |           |          |
| Controle       |         | 1,38                  | 0,62     | 10,56    | 7,44      | 2,85      |          |
| Não Peletizado | Sem Cal | Sem Fer               | 20,50 b* | 7,83 b*  | 87,87 b*  | 68,78 b*  | 44,60 b* |
|                |         | Com Fer               | 33,75 a* | 12,76 a* | 148,65 a* | 111,24 a* | 72,11 a* |
|                | Média   |                       | 27,13 A  | 10,30 A  | 118,26 A  | 90,01 A   | 58,35 A  |
|                | Com Cal | Sem Fer               | 23,98 b* | 9,48 b*  | 104,71 b* | 80,91 b*  | 53,85 b* |
|                |         | Com Fer               | 36,72 a* | 13,99 a* | 157,02 a* | 124,16 a* | 79,46 a* |
|                | Média   |                       | 30,35 A  | 11,74 A  | 130,86 A  | 102,53 A  | 66,66 A  |
| Média          |         | 28,74 C               | 11,02 C  | 124,56 C | 96,27 C   | 62,50 C   |          |
| Peletizado     | Sem Cal | Sem Fer               | 24,61 b* | 9,43 b*  | 105,13 b* | 81,54 b*  | 54,03 b* |
|                |         | Com Fer               | 32,58 a* | 12,35 a* | 138,44 a* | 107,11 a* | 68,33 a* |
|                | Média   |                       | 28,60 A  | 10,89 A  | 121,79 A  | 94,33 A   | 61,18 A  |
|                | Com Cal | Sem Fer               | 25,55 b* | 9,65 b*  | 109,73 b* | 86,98 b*  | 57,36 b* |
|                |         | Com Fer               | 37,77 a* | 14,78 a* | 169,73 a* | 134,86 a* | 86,00 a* |
|                | Média   |                       | 31,66 A  | 12,22 A  | 139,73 A  | 110,92 A  | 71,68 A  |
| Média          |         | 30,13 C               | 11,55 C  | 130,76 C | 102,62 C  | 66,43 C   |          |

Médias com asteriscos (\*) diferem do controle pelo teste de Dunnett ( $p < 0,05$ ). Letras minúsculas nas colunas comparam os tratamentos com e sem fertilizante, dentro dos tratamentos sem e com calagem pelo teste de F ( $p < 0,05$ ). As letras maiúsculas "A" e "B" comparam os tratamentos sem e com calagem e as letras maiúsculas "C" e "D" comparam o biochar sem e com peletização pelo teste de F ( $p < 0,05$ ).

Fonte: Do autor, 2022.

## 6 CONCLUSÕES

- O BEB sem e com peletização elevou o pH, a CTC, a saturação por bases e a disponibilização de nutrientes no solo.
- A aplicação combinada de biochar peletizado com fertilizante PK aumentou os teores de P e K no solo.
- O BEB peletizado, enriquecido com fertilizante PK, contribuiu ao acúmulo de matéria seca do capim *U. brizantha* cv. BRS Paiaguás, demonstrando ser um fertilizante organomineral promissor, sobretudo, em função da liberação lenta de nutrientes, que diminui as perdas por lixiviação ou fixação no solo.

## 7 REFERÊNCIAS

- 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**, v. 117, p. 66-71, 2014.
- AGUIAR, A. P. A. **Manejo da fertilidade do solo sob pastagem: Calagem e Adubação**. 1 Ed. Guaíba, RS: Agropecuária LTDA, 1998. 120p.
- AHMAD, M.; RAJAPAKSHA, A. U.; LIM, J. E.; ZHANG, M.; BOLAN, N.; MOHAN, D.; VITHANAGE, M.; LEE, S. S.; OK, Y. S. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. **Chemosphere**, v. 99, p. 19-33, 2014.
- ALEWELL, C.; RINGEVAL, B.; BALLABIO, C.; ROBINSON, D. A.; PANAGOS, P.; BORRELLI, P. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion. **Nature Communications**, v. 11, n. 4546, p. 1-12, 2020.
- ALI, A.; GUO, D.; ZHANG, Y.; SUN, X.; JIANG, S.; GUO, Z.; HUANG, H.; LIANG, W.; LI, R.; ZHANG, Z. Using bamboo biochar with compost for the stabilization and phytotoxicity reduction of heavy metals in mine-contaminated soils of China. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1-12, 2017.
- ALVES, F. G. S.; FELIX, B. A.; PEIXOTO, M. S. M.; DOS SANTOS, P. M.; DA COSTA, R. B.; SALES, R. O. Considerations pasture management in the semiarid region of Brazil: A Review. **Revista Brasileira de Higiene e Sanidade Animal**, v. 8, n. 4, p. 259-283, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL – ASTM. **Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal**. D1762 – 84. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2007.
- AYE, N. S.; SALE, P. W. G.; TANG, C. The impact of long-term liming on soil organic carbon and aggregate stability in low-input acid soils. **Biol Fertil Soils**, v. 52, n. 5, p. 697-709, 2016.
- BAZARGAN, A.; ROUGH, S. L.; MCKAY, G. Compaction of palm kernel shell biochars for application as solid fuel. **Biomass and bioenergy**, v. 70, p. 489-497, 2014.
- BISTA, P.; GHIMIRE, R.; MACHADO, S.; PRITCHETT, L. Biochar Effects on Soil Properties and Wheat Biomass vary with Fertility Management. **Agronomy**, v. 10, n. 9, p. 623-632, 2019.
- BRTNICKY, M.; DATTA, R.; HOLATKO, J.; BIELSKA, L.; GUSIATINE, Z. M.; KUCERIK, J.; HAMMERSCHMIEDT, T.; DANISH, S.; RADZIEMSKA, M.; MRAVCOVA, L.; FAHAD, S.; KINTL, A.; SUDOMA, M.; AHMED, N.; PECINA, V. A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment. **Science of the Total Environment**, v. 796, n. 148756, p. 1-18, 2021.
- CANTRELL, K. B.; HUNT, P. G.; UCHIMIYA, M.; NOVAK, J. M.; RO, K. S. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. **Bioresource Technology**, v. 107, p. 419-428, 2012.
- CAVALCANTI, A. C.; PARTELLI, F. L.; GONTIJO, I.; DIAS, J. R. M.; FREITAS, M. S. M.; DE CARVALHO, A. J. C. Establishment of leaf nutrient patterns for the nutritional diagnosis of *Urochloa brizantha* pastures in two seasons. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 43, n. e50359, p. 1-10, 2021.
- COLEN, F.; FIGUEIREDO, F. F.; FERNANDES, L. A.; SAMPAIO, R. A.; MOTA, F. C.; DE SOUZA, L. H. Temperatura e tempo de residência na produção de biochar oriundo de dejetos de galinhas poedeiras. **Caderno de Ciências Agrárias**, v. 12, p. 1-8, 2020.
- CONZ, R. F.; ABBRUZZINI, T. F.; ANDRADE, C. A.; MILORI, D. M. B. P.; CERRI, C. E. P. Effect of Pyrolysis Temperature and Feedstock Type on Agricultural Properties and Stability of Biochars. **Agricultural Sciences**, v. 8, n. 9, p. 914-933, 2017.
- CYBULAK, M.; SOKOŁOWSKA, Z.; BOGUTA, P. The influence of biochar on the content of carbon and the chemical transformations of fallow and grassland humic acids. **Scientific Reports**, v. 11, n. 5698, p. 1-14, 2021.

- DA SILVA, G. M.; DA SILVA, F. F.; VIANA, P. T.; RODRIGUES, E. S. O.; MOREIRA, C. N.; MENESES, M. A.; ABREU JÚNIOR, J. S.; RUFINO, C. A.; BARRETO, L. S. Tropical forage evaluation: Review. **Publicações em Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 10, n. 3, p. 190-196, 2016.
- DA SILVA, I. C. B.; BASÍLIO, J. J. N.; FERNANDES, L. A.; COLEN, F.; ARRUDA, R. A.; FRAZÃO, L. A. Biochar from different residues on soil properties and common bean production. **Scientia Agricola**, v. 74, n. 5, p. 378-382, 2017a.
- DA SILVA, I. C. B.; FERNANDES, L. A.; COLEN, F.; SAMPAIO, R. A. Growth and production of common bean fertilized with biochar. **Ciência Rural**, v. 47, n. 11, p. 1-8, 2017b.
- DAI, L.; LI, H.; TAN, F.; ZHU, N.; HE, M.; HU, G. Biochar: a potential route for recycling of phosphorus in agricultural residues. **GCB Bioenergy**, v. 8, n. 5, p. 852-858, 2016.
- DE PAULA, L. C.; CEZÁRIO, A. S.; DE OLIVEIRA, N. C.; VIEIRA, M. L.; BARROS, J. P.; DAMASCENA, E. G.; RABELO, A. P. B.; DOS SANTOS, B. R. Manejo e adaptação de pastagens do gênero *Urochloa* em solos do cerrado. **Colloquium Agrariae**, v. 13, n. Especial, p. 276-288, 2017.
- DE SOUZA, J. G.; DOS SANTOS, B. C. S.; COSTA, M. E. S.; DOS SANTOS, M. K.; DOS SANTOS, C. H.; MAZZUCHELLI, R. C. L.; ALVES, M. R. Organic waste and biochars for soil conditioner purposes. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, p. 1-21, 2021.
- DE SOUZA, L. C.; DE LIMA, H. V.; RODRIGUES, S.; KERN, D. C.; DA SILVA, A. P.; PICCININ, J. L. Chemical and physical properties of an anthropogenic dark earth soil from Bragança, Para, Eastern Amazon. **Acta Amazônica**, v. 46, n. 4, p. 337-344, 2016.
- DOMINGUES, A. A.; SANTOS, A. J. M.; BACKES, C.; RODRIGUES, L. M.; TEODORO, A. G.; BESSA, S. V.; RIBON, A. A.; GIONGO, P. R.; DE GODOY, J. G.; DE RESENDE, C. C. F. Nitrogen fertilization of paiguás grass: production and nutrition. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 8, n. 2, p. 1-10, 2021.
- DOMINGUES, R. R.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, C. A.; DE MELO, I. C. N. A.; MELO, L. C. A.; MAGRIOTIS, Z. M.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A. Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. **PLoS ONE**, v. 12, n. 5, p. 1-19, 2017.
- DOS SANTOS, F. G. R.; DE ARAÚJO, R. A.; CÂNDIDO, M. J. D.; ROGÉRIO, M. C. P.; COSTA, C. S.; DA SILVA, V. J.; FURTADO, R. N.; POMPEU, R. C. F. F. Gas exchange, chemical composition and productive characteristics of tropical grasses deferred II: cultivars BRS Paiguás and BRS Piatã. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 22, p. 1-16, 2021.
- DOS SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; DOS ANJOS, L. H. C.; DE OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; DE ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; DE OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 Ed. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2018. 356p.
- DOS SANTOS, S. R.; LUSTOSA FILHO, J. F.; VERGÜTZ, L.; MELO, L. C. A. Biochar association with phosphate fertilizer and its influence on phosphorus use efficiency by maize. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 43, n. e025718, p. 1-11, 2019.
- DUME, B.; MOSSISSA, T.; NEBIYU, A. Effect of biochar on soil properties and lead (Pb) availability in a military camp in South West Ethiopia. **African Journal of Environmental Science and Technology**, v. 10, n. 3, p. 77-85, 2016.
- DÜNISCH, O.; LIMA, V. C.; SEEHANN, G.; DONATH, J.; MONTÓIA, V. R.; SCHWARZ, T. Retention properties of wood residues and their potential for soil amelioration. **Wood Science and Technology**, v. 41, n. 2, p. 169-189, 2007.
- ELLWANGER, J. H.; KULMANN-LEAL, B.; KAMINSKI, V.; VALVERDE-VILLEGAS, J. M.; DA VEIGA, A. B.; SPILKI, F. R.; FEARNSIDE, P. M.; CAESAR, L.; GIATTI, L. L.; WALLAU, G. L.; ALMEIDA, S. E.; BORBA, M. R.; DA HORA, V.; CHIES, J. A. B. Beyond diversity loss and climate change: Impacts of Amazon deforestation on infectious diseases and public health. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 92, n. 1, p. 1-33, 2020.

- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Soluções Tecnológicas: Brachiaria brizantha - BRS Paiaguás**. 2013. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-produtos-processos-e-servicos/-/produto-servico/892/brachiaria-brizantha---brs-paiaguas>>. Acesso em: 18 de janeiro de 2022.
- EUCLIDES, V. P. B.; MONTAGNER, D. B.; BARBOSA, R. A.; DO VALLE, C. B.; NANTES, N. N. Animal performance and sward characteristics of two cultivars of *Brachiaria brizantha* (BRS Paiaguás and BRS Piatã). **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 45, n. 3, p. 85-92, 2016.
- FÁTIMA, I.; AHMAD, M.; VITHANAGE, M.; IQBAL, S. Abstraction of nitrates and phosphates from water by sawdust- and rice husk-derived biochars: Their potential as N- and P-loaded fertilizer for plant productivity in nutrient deficient soil. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 155, p. 1-9, 2021.
- FERREIRA, R. R. M.; TAVARES FILHO, J.; FERREIRA, V. M. Effects of pasture system management on physical properties. **Semina: Ciências Agrárias, Londrina**, v. 31, n. 4, p. 913-932, 2010.
- FINATTO, J.; ALTMAYER, T.; MARTINI, M. C.; RODRIGUES, M.; BASSO, V.; HOEHNE, L. A importância da utilização da adubação orgânica na agricultura. **Revista Destaques Acadêmicos**, v. 5, n. 4, 2013.
- GALEMBECK, F.; GALEMBECK, A.; DOS SANTOS, L. NPK: Essentials for sustainability. **Química Nova**, v. 42, n. 10, p. 1199-1207, 2019.
- GAVILI, E.; MOOSAVI, A. A.; CHOGHAMARANI, F. M. 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.; WIEDNER, K.; SEELIG, S.; SCHMIDT H.; GERBER, H. Biochar organic fertilizers from natural resources as substitute for mineral fertilizers. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 35, n. 2, p. 667-678, 2015.
- GONDIM, R. S.; MUNIZ, C. R.; LIMA, C. E. P.; DOS SANTOS, C. L. A. Explaining the water-holding capacity of biochar by scanning electron microscope images. **Revista Caatinga**, v. 31, n. 4, p. 972-979, 2018.
- GOULDING, K. W. T. Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. **Soil Use and Management**, v. 32, n. 3, p. 390-399, 2016.
- GUNAMANTHA, I. M.; WIDANA, G. A. B. Characterization the potential of biochar from cow and pig manure for geoecology application. **Earth and Environmental Science**, v. 131, n. 1, p. 1-6, 2018.
- GUNES, A.; INAL, A.; TASKIN, M. B.; SAHIN, O.; KAYA, E. C.; ATAKOL, 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.
- GWENZI, W.; MUZAVA, M.; MAPANDA, F.; TAURO, T. P. 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**, v. 15, n. 6, p. 1395-1406, 2016.
- HALE, S. E.; NURIDA, N. L.; JUBAEDAH; MULDER, J.; SØRMO, E.; SILVANI, L.; ABIVEN, S.; JOSEPH, S.; TAHERYMOOSAVI, S.; CORNELISSEN, G. The effect of biochar, lime and ash on maize yield in a long-term field trial in a Ultisol in the humid tropics. **Science of the Total Environment**, v. 719, p. 1-9, 2020.
- HAMMER, E. C.; BALOGH-BRUNSTAD, Z.; JAKOBSEN, I.; OLSSON, P. A.; STIPP, S. L.; RILLIG, M. C. A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 77, p. 252-260, 2014.
- HE, L.; ZHONG, H.; LIU, G.; DAI, Z.; BROOKES, P. C.; XU, J. Remediation of heavy metal contaminated soils by biochar: Mechanisms, potential risks and applications in China. **Environmental Pollution**, v. 252, p. 846-855, 2019.
- HU, Q.; SHAO, J.; YANG, H.; YAO, D.; WANG, X.; CHEN, H. Effects of binders on the properties of biochar pellets. **Applied Energy**, v. 157, p. 508-516, 2015.

- HU, Q.; YANG, H.; YAO, D.; ZHU, D.; WANG, X.; SHAO, J.; CHEN, H. The densification of bio-char: Effect of pyrolysis temperature on the qualities of pellets. **Bioresource Technology**, v. 200, p. 521-527, 2016.
- JANU, R.; MRLIK, V.; RIBITSCH, D.; HOFMAN, J.; SEDLÁČEK, P.; BIELSKÁ, L.; SOJA, G. Biochar surface functional groups as affected by biomass feedstock, biochar composition and pyrolysis temperature. **Carbon Resources Conversion**, v. 4, p. 36-46, 2021.
- JHA, P.; NEENU, S.; RASHMI, I.; MEENA, B. P.; JATAV, R. C.; LAKARIA, B. L.; BISWAS, A. K.; SINGH, M.; PATRA, A. K. Ameliorating Effects of Leucaena Biochar on Soil Acidity and Exchangeable Ions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 47, n. 10, p. 1252-1262, 2016.
- JIANG, J.; YUAN, M.; XU, R.; BISH, D. L. Mobilization of phosphate in variable-charge soils amended with biochars derived from crop straws. **Soil & Tillage Research**, v. 146, p. 139-147, 2015.
- JOCHIMS, F.; DA SILVA, P. A. P.; PORTES, V. M. Using sward height to manage pastures. **Agropecuária Catarinense**, v. 31, n. 2, p. 42-44, 2018.
- JOSEPH, S.; COWIE, A. L.; ZWIETEN, L. V.; BOLAN, N.; BUDAI, A.; BUSS, W.; CAYUELA, M. L.; GRABER, E. R.; IPPOLITO, J. A.; KUZYAKOV, Y.; LUO, Y.; OK, Y. S.; PALANSOORIYA, K. N.; SHEPHERD, J.; STEPHENS, S.; WENG, Z. H.; LEHMANN, J. How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. **GCB Bioenergy**, v. 13, n. 11, p. 1731-1764, 2021.
- JOSKO I.; OLESZCZUK, P.; PRANAGAL, J.; LEHMANN, J.; XING, B.; CORNELISSEN, G. Effect of biochars, activated carbon and multiwalled carbon nanotubes on phytotoxicity of sediment contaminated by inorganic and organic pollutants. **Ecological Engineering**, v. 60, p. 50-59, 2013.
- KARIM, A. A.; KUMAR, M.; SINGH, E.; KUMAR, A.; KUMAR, S.; RAY, A.; DHAL, N. K. Enrichment of primary macronutrients in biochar for sustainable agriculture: A review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, p. 1-42, 2021.
- KERN, D. C., LIMA, H. P., DA COSTA, J. A., DE LIMA, H. V., BROWNE RIBEIRO, A., MORAES, B. M. & KÄMPF, N. Terras pretas: Approaches to formation processes in a new paradigm. **Geoarchaeology**, v.32, n. 6, p. 694-706, 2017.
- KIM, P.; HENSLEY, D.; LABBÉ, N. Nutrient release from switchgrass-derived biochar pellets embedded with fertilizers. **Geoderma**, v. 232-234, n. 8, p. 341-351, 2014.
- KNICKER, H. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. **Biogeochemistry**, v. 85, n. 1, p. 91-118, 2007.
- KOHN, J.; ZIMMER, D.; LEINWEBER, P. Is phosphorus really a scarce resource?. **International Journal of Environmental Technology and Management**, v. 21, n. 5-6, p. 373-395, 2018.
- KONG, L.; TIAN, S. H.; LI, Z.; LUO, R.; CHEN, D.; TU, Y. T.; XIONG, Y. Conversion of recycled sawdust into high HHV and low NOx emission bio-char pellets using lignin and calcium hydroxide blended binders. **Renewable Energy**, v. 60, p. 559-565, 2013.
- LAL, R.; GUO, M.; HE, Z.; UCHIMIYA, S. M. Biochar and Soil Carbon Sequestration. **Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers**, v. 63, p. 175-197, 2016.
- LATAWIEC, A. E.; STRASSBURG, B. B. N.; JUNQUEIRA, A. B.; ARAUJO, E.; DE MORAES, L. F. D.; PINTO, H. A. N.; CASTRO, A.; RANGEL, M.; MALAGUTI, G. A.; RODRIGUES, A. F.; BARIONI, L. G.; NOVOTNY, E. H.; CORNELISSEN, G.; MENDES, M.; BATISTA, N.; GUERRA, J. G.; ZONTA, E.; JAKOVAC, C.; HALE, S. E. Biochar amendment improves degraded pasturelands in Brazil: environmental and cost-benefit analysis. **Scientific Reports**, v. 9, n. 11993, 2019.
- LEHMANN, J.; GAUNT, J.; RONDON, M. Bio-char Sequestration in Terrestrial Ecosystems – A Review. **Mitigation and adaptation strategies for global change**, v. 11, n. 2, p. 403-427, 2006.
- LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for Environmental Management: Science and Technology**. 1 Ed. London: Earthscan, 2009. 438p.

- LEHMANN, J.; RILLIG, M. C.; THIES, J.; MASIELLO, C. A.; HOCKADAY, W. C.; CROWLEY, D. Biochar effects on soil biota – A review. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 43, n. 9, p. 1812-1836, 2011.
- LEHMANN, J.; SILVA JÚNIOR, J. P.; STEINER, C.; NEHLS, T.; ZECH, W.; GLASER, B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant and Soil**, v. 249, p. 343-357, 2003.
- LENG, L.; XIONG, Q.; YANG, L.; LI, H.; ZHOU, Y.; ZHANG, W.; JIANG, S.; LI, H.; HUANG, H. An overview on engineering the surface area and porosity of biochar. **Science of the Total Environment**, v. 763, n. 144204, p. 1-18, 2021.
- LI, C.; BAIR, D. A.; PARIKH, S. J. Estimating potential dust emissions from biochar amended soils under simulated tillage. **Science of The Total Environment**, v. 625, p. 1093-1101, 2018.
- LI, H.; JIANG, L. B.; LI, C. Z.; LIANG, J.; YUAN, X. Z.; XIAO, Z. H.; XIAO, Z. H.; WANG, H. Co-pelletization of sewage sludge and biomass: The energy input and properties of pellets. **Fuel Processing Technology**, v. 132, p. 55-61, 2015.
- LI, R.; WANG, J. J.; GASTON, L. A.; ZHOU, B.; LI, M.; XIAO, R.; WANG, Q.; ZHANG, Z.; HUANG, H.; LIANG, W.; HUANG, H.; ZHANG, X. An overview of carbothermal synthesis of metal–biochar composites for the removal of oxyanion contaminants from aqueous solution. **Carbon**, v. 129, p. 674-687, 2018.
- LI, R.; WANG, J. J.; ZHOU, B.; AWASTHI, M. K.; ALI, A.; ZHANG, Z.; LAHORI, A. H.; MAHAR, A. Recovery of phosphate from aqueous solution by magnesium oxide decorated magnetic biochar and its potential as phosphate-based fertilizer substitute. **Bioresource Technology**, v. 215, p. 209-214, 2016.
- LIM, J. E.; LEE, S. S.; OK, Y. S. Efficiency of poultry manure biochar for stabilization of metals in contaminated soil. **Journal of Applied Biological Chemistry**, v. 58, n. 1, p. 39-50, 2015.
- LIMA, J. R. S.; OLIVEIRA, J. E. S.; MOURA, A. S.; SILVA, C. F.; DE MEDEIROS, E. V.; HAMMECKER, C. Produção e eficiência no uso de água do feijão comum adubado com biochar. **Diversitas Journal**, v. 4, n. 3, p. 1146-1155, 2019.
- LUO, W.; QIAN, L.; LIU, W.; ZHANG, X.; WANG, Q.; JIANG, H.; CHENG, B.; MA, H.; WU, Z. A potential Mg-enriched biochar fertilizer: Excellent slow-release performance and release mechanism of nutrients. **Science of the Total Environment**, v. 768, n. 144454, p. 1-11, 2021.
- LUO Y.; YU Z. Y.; ZHANG K. L.; XU J. M.; BROOKES PC. The properties and functions of biochars in forest ecosystems. **Journal of Soils and Sediments**. v.16, p 2005–2020, 2016.
- LUSTOSA FILHO, J. F.; CARNEIRO, J. S. S.; BARBOSA, C. F.; DE LIMA, K. P.; LEITE, A. A.; MELO, L. C. A. Aging of biochar-based fertilizers in soil: Effects on phosphorus pools and availability to *Urochloa brizantha* grass. **Science of the Total Environment**, v. 709, p. 1-10, 2020.
- LUSTOSA FILHO, J. F.; PENIDO, E. S.; CASTRO, P. P.; SILVA, C. A.; MELO, L. C. A. Co-Pyrolysis of Poultry Litter and Phosphate and Magnesium Generates Alternative Slow-Release Fertilizer Suitable for Tropical Soils. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 5, n. 10, p. 9043-9052, 2017.
- MACEDO, R. S.; TEIXEIRA, W. G.; LIMA, H. N.; DE SOUZA, A. C. G.; SILVA, F. W. R.; ENCINAS, O. C.; NEVES, E. G. Amazonian dark earths in the fertile floodplains of the Amazon River, Brazil: an example of non-intentional formation of anthropic soils in the Central Amazon region. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas**, v. 14, n. 1, p. 207-227, 2019.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de Nutrição Mineral de Plantas**. 1 Ed. São Paulo, SP: Agronômica Ceres, 1980. 252p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; DE OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2 Ed. Piracicaba, SP: Potafos, 1997. 319p.
- MALORGIO, G.; MARANGON, F. Agricultural business economics: the challenge of sustainability. **Agricultural and Food Economics**, v. 9, n. 6, p. 1-4, 2021.

- MAROUŠEK, J.; VOCHOZKA, M.; PLACHÝ, J.; ŽÁK, J. Glory and misery of biochar. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 19, n. 2, p. 311-317, 2017.
- MARTHA JÚNIOR, G. B.; VILELA, L.; DE SOUSA, D. M. G. **Cerrado**: Uso eficiente de corretivos e fertilizantes em pastagens. 1 Ed. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. 224p.
- MEENA, H. M.; PRAKASHA, H. C. Effect of biochar, lime and soil test value based fertilizer application on soil fertility, nutriente uptake and yield of rice-cowpea cropping system in an acid soil of Karnataka. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, n. 17, p. 1-16, 2020.
- MELO, A. F.; TEIXEIRA, M. B.; DOS SANTOS, E. A.; DE JESUS, T. F.; CABRAL FILHO, F. R.; CUNHA, F. N.; VIDAL, V. M.; SOARES, F. A. L.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; DE ARAÚJO, L. C.; DE LAURENTIZ, A. C.; FERNANDES, P. B.; DA SILVA, E. C. Productive performance of Brachiaria (syn. Urochloa) brizantha cultivars under organic fertilization. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, p. 1-19, 2021.
- MILES, J. W.; MAASS, B. L.; DO VALLE, C. B. **Brachiaria**: Biology, Agronomy, and Improvement. 1 Ed. Cali, Colombia: International Center for Tropical Agriculture, 1996. 288p.
- MOHAMED, I.; ALI, M.; AHMED, N.; ABBAS, M. H. H.; ABDELSALAM, M.; AZAB, A.; RALEVE, D.; FANG, C. Cow manure-loaded biochar changes Cd fractionation and phytotoxicity potential for wheat in a natural acidic contaminated soil. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 162, p. 348-353, 2018.
- MOHAMMADI, A. Overview of the Benefits and Challenges Associated with Pelletizing Biochar. **Processes**, v. 9, n. 1591, p. 1-11, 2021.
- MONTOYA, J. I.; CHEJNE-JANNA, F.; GARCIA-PÉREZ, M. Fast pyrolysis of biomass: A review of relevant aspects. Part I: Parametric study. **DYNA**, v. 82, n. 192, p. 239-248, 2015.
- MOSHARROF, M.; UDDIN, M. K.; SULAIMAN, M. F.; MIA, S.; SHAMSUZZAMAN, S. M.; HAQUE, A. N. A. Combined Application of Biochar and Lime Increases Maize Yield and Accelerates Carbon Loss from an Acidic Soil. **Agronomy**, v. 11, n. 7, p. 1-20, 2021.
- MUKHERJEE, A.; LAL, R. **Biochar and Soil Quality**. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2016.
- NGUYEN, A. T. Q.; BUI, T. A.; MAI, N. T.; TRAN, H. T.; TRAN, S. V.; NGUYEN, N. H.; TSUBOTA, T.; SHINOBI, Y.; DULTZ, S.; NGUYEN, M. N. Release kinetics of potassium from silica-rich fern-derived biochars. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 3, p. 1713-1725, 2020.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. 1 Ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.
- NOVOTNY, E. H.; MAIA, C. M. B. F.; CARVALHO, M. T. M.; MADARI, B. E. Biochar: Pyrogenic carbon for agricultural use – A critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 321-344, 2015.
- ORAM, N. J.; VAN DE VOORDE, T. F. J.; OUWEHAND, G. J.; BEZEMER, T. M.; MOMMER, L.; JEFFERY, S.; VAN GROENIGEN, J. W. Soil amendment with biochar increases the competitive ability of legumes via increased potassium availability. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 191, p. 92-98, 2014.
- PARADELO, R.; VIRTO, I.; CHENU, C. Net effect of liming on soil organic carbon stocks: A review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 202, p. 98-107, 2015.
- PATHY, A.; RAY, J.; PARAMASIVAN, B. Biochar amendments and its impact on soil biota for sustainable agriculture. **Biochar**, v. 2, p. 287-305, 2020.
- PENG, J.; ZHANG, L.; MEULIEN, E. S.; BI, X. T.; LIM, J. C.; CHEN, W. Waste Plastics as an Effective Binder for Biochar Pelletization. **Energy Fuels**, v. 35, n. 17, p. 13840-13846, 2021.
- PEREIRA, O. J. R.; FERREIRA, L. G.; PINTO, F.; Baumgarten, L. Assessing Pasture Degradation in the Brazilian Cerrado Based on the Analysis of MODIS NDVI Time-Series. **Remote Sensing in Agriculture and Vegetation**, v. 10, n. 11, 2018a.



PEREIRA, L. E. T.; NISHIDA, N. T.; CARVALHO, L. R.; HERLING, V. R. **Recomendações para correção e adubação de pastagens tropicais**. 1 Ed. Pirassununga, SP: Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da USP, 2018b. 56p.

PIRES, W. **Manual da pastagem: formação, manejo e recuperação**. 1 Ed. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, 2006. 302p.

POLETTO, M. Assessment of the thermal behavior of lignins from softwood and hardwood species. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 19, n. 1, p. 63-74, 2017.

PROTÁSIO, T. P.; DA COSTA, J. S.; SCATOLINO, M. V.; LIMA, M. D. R.; DE ASSIS, M. R.; DA SILVA, M. G.; BUFALINO, L.; DIAS JÚNIOR, A. F.; TRUGILHO, P. F. Revealing the influence of chemical compounds on the pyrolysis of lignocellulosic wastes from the Amazonian production chains. **International Journal of Environmental Science and Technology**, p. 1-18, 2021.

RABILEH, M. A.; SHAMSHUDDIN, J.; PANHWAR, Q. A.; ROSENANI, A. B.; ANUAR, A. R. Effects of biochar and/or dolomitic limestone application on the properties of Ultisol cropped to maize under glasshouse conditions. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 95, n. 1, p. 37-47, 2015.

RAJKOVICH, S.; ENDERS, A.; HANLEY, K.; HYLAND, C.; ZIMMERMAN, A. R.; LEHMANN, J. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. **Biol Fertil Soils**, v. 48, n. 3, p. 271-284, 2012.

REHRAH, D.; REDDY, M. R.; NOVAK, J. M.; BANSODE, R. R.; SCHIMMEL, K. A.; YU, J.; WATTS, D. W.; AHMEDNA, M. Production and characterization of biochars from agricultural by-products for use in soil quality enhancement. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 108, p. 301-309, 2014.

REVELL, K. T.; MAGUIRE, R. O.; AGBLEVOR, F. A. Influence of Poultry Litter Biochar on Soil Properties and Plant Growth. **Soil Science**, v. 177, n. 6, p. 402-408, 2012.

REZA, M. T.; LYNAM, J. G.; VASQUEZ, V. R.; CORONELLA, C. J. Pelletization of Biochar from Hydrothermally Carbonized Wood. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 31, n. 2, p. 225-234, 2012.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ÁLVAREZ, V. H. A. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. 1 Ed. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359p.

RIVA, L.; NIELSEN, H. K.; SKREIBERG, Ø.; WANG, L.; BARTOCCI, P.; BARBANERA, M.; BIDINI, G.; FANTOZZI, F. Analysis of optimal temperature, pressure and binder quantity for the production of biocarbon pellet to be used as a substitute for coke. **Applied Energy**, v. 256, n. 113933, p. 1-16, 2019.

ROMBEL, A.; KRASUCKA, P.; OLESZCZUK, P. Sustainable biochar-based soil fertilizers and amendments as a new trend in biochar research. **Science of the Total Environment**, n. 151588, p. 1-17, 2021.

SAFDARI, M. S.; RAHMATI, M.; AMINI, E.; HOWARTH, J. E.; BERRYHILL, J. P.; DIETENBERGER, M.; WEISE, D. R.; FLETCHER, T. H. Characterization of pyrolysis products from fast pyrolysis of live and dead vegetation native to the Southern United States. **Fuel**, v. 229, p. 151-166, 2018.

SANTOS FILHO, J. R.; SOUSA, B. M. L.; FAGUNDES, J. L.; BACKES, A. A.; SILVA, J. W. T.; ANDRADE, G. S.; DOS SANTOS, A. L. H.; FLORÊNCIO, R. S. R.; DA SILVA, V. C. Establishment of paiguas palisadegrass in monoculture or in an integration system with other crops. **Ciência Animal Brasileira**, v. 22, n. e-68211, p. 1-13, 2021.

SARFARAZ, Q.; DA SILVA, L. S.; DRESCHER, G. L.; ZAFAR, M.; SEVERO, F. F.; KOKKONEN, A.; DAL MOLIN, G.; SHAFI, M. I.; SHAFIQUE, Q.; SOLAIMAN, Z. M. Characterization and carbon mineralization of biochars produced from different animal manures and plant residues. **Scientific Reports**, v. 10, n. 955, p. 1-9, 2020.

SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. **Soja: do plantio à colheita**. 1 Ed. Viçosa, MG: UFV, 2015. 333p.

SEMIDA, W. M.; BEHEIRY, H. R.; SÉTAMOU, M.; SIMPSON, C. R.; EL-MAGEED, T. A. A.; RADY, M. M.; NELSON, S. D. Biochar implications for sustainable agriculture and environment: A review. **South African Journal of Botany**, v. 127, p. 333-347, 2019.

SERRA, L. S.; MENDES, M. R. F.; SOARES, M. V. A.; MONTEIRO, I. P. Revolução Verde: reflexões acerca da questão dos agrotóxicos. **Revista Científica do Centro de Estudos em Desenvolvimento Sustentável da UNDB**, v. 1, n. 4, 2016.

SEVERO, E. A.; DE GUIMARÃES, J. C. F.; DELLARME LIN, M. L.; RIBEIRO, R. P. The Influence of Social Networks on Environmental Awareness and the Social Responsibility of Generations. **BBR. Brazilian Business Review**, v. 16, p. 500-518, 2019.

SHETTY, R.; PRAKASH, N. B. Effect of different biochars on acid soil and growth parameters of rice plants under aluminium toxicity. **Scientific Reports**, v. 10, n. 12249, p. 1-11, 2020.

SIGUA, G. C.; NOVAK, J. M.; WATTS, D. W.; JOHNSON, M. G.; SPOKAS, K. Efficacies of designer biochars in improving biomass and nutrient uptake of winter wheat grown in a hard setting subsoil layer. **Chemosphere**, v. 142, p. 176-183, 2016.

SILVA, L. C. R.; CORRÊA, R. S.; WRIGHT, J. L.; BOMFIM, B.; HENDRICKS, L.; GAVIN, D. G.; MUNIZ, A. W.; MARTINS, G. C.; MOTTA, A. C. V.; BARBOSA, J. Z.; MELO, V. F.; YOUNG, S. D.; BROADLEY, M. R.; SANTOS, R. V. A new hypothesis for the origin of Amazonian Dark Earths. **Nature Communications**, v. 13, n. 127, p. 1-11, 2021.

SIM, D. H. H.; TAN, I. A. W.; LIM, L. L. P.; HAMEED, B. H. Encapsulated biochar-based sustained release fertilizer for precision agriculture: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 303, n. 127018, p. 1-18, 2021.

SINGH, S.; TRIPATHI, D. K.; SINGH, S.; SHARMA, S.; DUBEY, N. K.; CHAUHAN, D. K.; VACULÍK, M. Toxicity of aluminium on various levels of plant cells and organism: a review. **Environmental and Experimental Botany**, v. 137, p. 177-193, 2017.

SONG, W.; GUO, M. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 94, p. 138-145, 2012.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2 Ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416p.

SOUZA, C. S.; BOMFIM, M. R.; DE ALMEIDA, M. C.; ALVES, L. S.; DE SANTANA, W. N.; AMORIM, I. C. S.; SANTOS, J. A. G. Induced changes of pyrolysis temperature on the physicochemical traits of sewage sludge and on the potential ecological risks. **Scientific Reports**, v. 11, n. 974, p. 1-13, 2021.

SPERATTI, A. B.; JOHNSON, M. S.; SOUSA, H. M.; TORRES, G. N.; COUTO, E. G. Impact of different agricultural waste biochars on maize biomass and soil water content in a Brazilian Cerrado arenosol. **Agronomy**, v. 7, n. 49, p. 1-19, 2017.

SPOKAS, K. A.; NOVAK, J. M.; MASIELLO, C. A.; JOHNSON, M. G.; COLOSKY, E. C.; IPPOLITO, J. A.; TRIGO, C. Physical disintegration of biochar: an overlooked process. **Environmental Science & Technology Letters**, v. 1, n. 8, p. 326-332, 2014.

TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. **As Terras Pretas de Índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. 1 Ed. Manaus, AM: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. 420p.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3 Ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574p.

THAPA, S.; BHANDARI, A.; GHIMIRE, R.; XUE, Q.; KIDWARO, F.; GHATREHSAMANI, S.; MAHARJAN, B.; GOODWIN, M. Managing Micronutrients for Improving Soil Fertility, Health, and Soybean Yield. **Sustainability**, v. 13, n. 11766, p. 1-15, 2021.

TORRES, W. G. A.; COLEN, F.; PANDEY, S. D.; FRAZÃO, L. A.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A. Phosphorus availability in soil amended with biochar from rice rusk and cattle manure and cultivated with common bean. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 44, n. e014620, p. 1-10, 2020.

TRAZZI, P. A.; HIGA, A. R.; DIECKOW, J.; MANGRICH, A. S.; HIGA, R. C. V. Biochar: Reality and potential use in forestry. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 875-887, 2018.

TRIPATHI, M.; SAHU, J. N.; GANESAN, P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 467-481, 2016.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils, and Oils**. METHOD 3051A. Washington, DC: USEPA, 2007.

VAN RAIJ, B. **Fertilidade do solo e adubação**. 1 Ed. São Paulo, SP: Agronômica Ceres, 1991. 343p.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase–mineral and chemical composition and classification. **Fuel**, v. 105, p. 40-76, 2013.

VIGER, M.; HANCOCK, R. D.; MIGLIETTA, F.; TAYLOR, G. More plant growth but less plant defence? First global gene expression data for plants grown in soil amended with biochar. **Gcb Bioenergy**, v. 7, n. 4, p. 658-672, 2015.

WALI, F.; NAVEED, M.; BASHIR, M. A.; ASIF, M.; AHMAD, Z.; ALKAHTANI, J.; ALWAHIBI, M. S.; ELSHIKH, M. S. Formulation of Biochar-Based Phosphorus Fertilizer and Its Impact on Both Soil Properties and Chickpea Growth Performance. **Sustainability**, v. 12, n. 9528, p. 1-20, 2020.

WANG, T.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; HEDLEY, M.; BISHOP, P. Predicting phosphorus bioavailability from high-ash biochars. **Plant and Soil**, v. 357, p. 173-187, 2012.

WANG, T.; TANG, L.; FENG, X.; XU, J.; DING, L.; CHEN, X. Influence of organic binders on the pyrolysis performance of rice straw pellets. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 161, n. 105366, p. 1-9, 2022.

WANG, X.; TANG, C.; BALDOCK, J. A.; BUTTERLY, C. R.; GAZEY, C. Long-term effect of lime application on the chemical composition of soil organic carbon in acid soils varying in texture and liming history. **Biology and fertility of Soils**, v. 52, n. 3, p. 295-306, 2016.

WATERS, C. L.; JANUPALA, R. R.; MALLINSON, R. G.; LOBBAN, L. L. Staged thermal fractionation for segregation of lignin and cellulose pyrolysis products: An experimental study of residence time and temperature effects. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 126, p. 380-389, 2017.

WIDOWATI, W.; ASNAH, A. Biochar Can Enhance Potassium Fertilization Efficiency and Economic Feasibility of Maize Cultivation. **Journal of Agricultural Science**, v. 6, n. 2, p. 24-32, 2014.

WOICIECHOWSKI, T.; LOMBARDI, K. C.; GARCIA, F. A. O.; GOMES, G. S. Soil nutrients and moisture after incorporating biochar in na *Eucalyptus benthamii* FOREST. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 4, p. 1455-1464, 2018.

XING, X.; FAN, F.; JIANG, W. Characteristics of biochar pellets from corn straw under different pyrolysis temperatures. **Royal Society Open Science**, v. 5, n. 8, p. 1-10, 2018.

YAN, T.; XUE, J.; ZHOU, Z.; WU, Y. Biochar-based fertilizer amendments improve the soil microbial community structure in a karst mountainous área. **Science of the Total Environment**, v. 794, p. 1-12, 2021.

YAO, L.; YU, X.; HUANG, L.; ZHANG, X.; WANG, D.; ZHAO, X.; LI, Y.; HE, Z.; KANG, L.; LI, X.; LIU, D.; XIAO, Q.; GUO, Y. Responses of *Phaseolus calcutus* to lime and biochar application in an acid soil. **PeerJ**, v. 7, n. e6346, p. 1-25, 2019.

YU, K. L.; SHOW, P. L.; ONG, H. C.; LING, T. C.; CHEN, W.; SALLEH, M. A. M. Biochar production from microalgae cultivation through pyrolysis as a sustainable carbon sequestration and biorefinery approach. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 20, n. 9, p. 2047-2055, 2018.

ZAMAN, C. Z.; PAL, K.; YEHYE, W. A.; SAGADEVAN, S.; SHAH, S. T.; ADEBISI, G. A.; MARLIANA, E.; RAFIQUE, R. F.; JOHAN, R. B. **Pyrolysis: A Sustainable Way to Generate Energy from Waste**. Pyrolysis; Rijeka, Croatia: IntechOpen, 2017. 36p.

ZELAYA, K. P. S.; ALVES, B. S. Q.; COLEN, F.; FRAZÃO, L. A.; SAMPAIO, R. A.; PEGORARO, R. F.; FERNANDES, L. A. Biochar in sugar beet production and nutrition. **Ciência Rural**, v. 49, n. 5, p. 1-9, 2019.

ZHAO, B.; XU, H.; ZHANG, T.; NAN, X.; MA, F. Effect of pyrolysis temperature on sulfur content, extractable fraction and release of sulfate in corn straw biochar. **RSC Advances**, v. 8, n. 62, p. 35611-35617, 2018.

ZHAO, L.; CAO, X.; MASEK, O.; ZIMMERMANN, A. Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures. **Journal of Hazardous Materials**, v. 256-257, p. 1-9, 2013.

ZHU, Q.; KONG, L.; XIE, F.; ZHANG, H.; WANG, H.; AO, X. Effects of biochar on seedling root growth of soybeans. **Chilean journal of agricultural research**, v. 78, n. 4, p. 549-558, 2018.