



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

IVAN EUZÉBIO DA SILVA

**EFEITOS DA COMBINAÇÃO DE COMPOSTO ORGÂNICO COM BIOCARVÃO
SOBRE A PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE *Brachiaria brizantha* E ALTERAÇÕES NAS
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO**

FORTALEZA

2022

IVAN EUZÉBIO DA SILVA

EFEITOS DA COMBINAÇÃO DE COMPOSTO ORGÂNICO COM BIOCARVÃO SOBRE A
PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE *Brachiaria brizantha* E ALTERAÇÕES NAS
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola do Departamento de Engenharia
Agrícola da Universidade Federal do Ceará,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área
de concentração: Irrigação e drenagem

Orientador (a): Claudivan Feitosa de Lacerda
Coorientador (a): Neyton de Oliveira Miranda

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S58e Silva, Ivan Euzébio da.
Efeitos da combinação de composto orgânico com biocarvão sobre a produção de biomassa de *Brachiaria brizantha* e alterações nas características químicas do solo / Ivan Euzébio da Silva. – 2022.
75 f.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Claudivan Feitosa de Lacerda.
Coorientação: Prof. Dr. Neyton de Oliveira Miranda.
1. Biochar. 2. Pirólise. 3. Manejo do solo. 4. Acidez do solo. 5. Retenção de nutrientes. I. Título.
CDD 630
-

IVAN EUZÉBIO DA SILVA

EFEITOS DA COMBINAÇÃO DE COMPOSTO ORGÂNICO COM BIOCÁRVÃO SOBRE A
PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE *Brachiaria brizantha* E ALTERAÇÕES NAS
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola do Departamento de Engenharia
Agrícola da Universidade Federal do Ceará,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área
de concentração: Irrigação e drenagem.

Aprovada em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Claudivan Feitosa de Lacerda (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Neyton de Oliveira Miranda (Coorientador)
Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)

Prof. Dr. Miguel Ferreira Neto
Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)

Prof. Dr. Luís Clênio Jairo Moreira
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

À minha família, especialmente aos meus pais Maria das Graças e Agostinho Euzébio, pela fé, coragem e determinação de apostar todas as suas fichas em quem vos escreve, estando dispostos a aumentar seus níveis de humildade para poder proporcionar esse momento e eu chegar até aqui. A minha filha Maria Íris pelos momentos que tive que me ausentar para construir esse sonho que é nosso, e por último e não menos importante a minha esposa Nathalia Gomes por toda paciência e parceria durante todo esse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me dado oportunidade de concretizar este grande sonho.

Aos meus pais Agostinho Euzébio e Marias das Graças por ter depositado confiança e dedicação total em todos os momentos da minha vida acadêmica, pelas palavras de incentivo, pelos gestos de compreensão, e toda a segurança fornecida. A vocês que sempre estiveram comigo nos momentos mais difíceis desta conquista, o meu sorriso, meu carinho e o meu muito obrigado! Amo vocês!

As minhas irmãs Ivoneide, Irineuda, Ireuda e Ivanilda.

A minha filha Maria Íris, que me acompanhou e superou a minha ausência quando tinha que fugir para ir a Fortaleza. Acredite meu amor, foi por uma boa causa, sem você, essa conquista não teria o mesmo significado. Te amo!

A minha esposa Nathalia Gomes. Obrigado meu amor por tudo, obrigado por transformar a minha vida. Obrigado pelo teu carinho, tua atenção e seu amor, e por está ao meu lado em todos os momentos seja os fáceis ou os difíceis e que me ajudou a superar.

Aos mestres pela contribuição não só pelo conhecimento e formação acadêmica, e sim pela construção de grandes cidadãos perante a sociedade.

Ao meu orientador Claudivan Feitosa e meu coorientador Neyton Miranda, pela dedicação e paciência ao longo desse projeto.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFC, pelo acolhimento e aprendizado dentro e fora das salas de aulas.

A Universidade Federal do Ceará, pela realização do sonho de ser aluno da casa, meu muito obrigado, muito orgulho de ter meu nome escrito nessa instituição.

A todos meus familiares e amigos que direta ou indiretamente estiveram comigo na trajetória desse sonho.

E por fim, mas não menos importante, a empresa no qual me tornou o profissional que sou hoje e por também permitir que essa qualificação profissional fosse possível, meu muito obrigado Meri Pobo Agropecuária.

Meu muito obrigado!

“A mudança não chegará se esperamos outra pessoa ou outro tempo. Somos nós mesmos os que estávamos esperando. Somos a mudança que buscamos”

(Barack Obama)

RESUMO

A aplicação de biochar tem grande potencial de aumentar os teores de nutrientes na solução do solo, favorecendo o desenvolvimento vegetal. Entretanto, o uso isolado do biochar com características de baixa disponibilidade de nutrientes pode ser ineficiente, especialmente em solos de baixa fertilidade. Nesse contexto, objetivou-se quantificar os efeitos da aplicação de biocarvão de madeira de eucalipto e de sua mistura com composto orgânico sobre a produção de biomassa de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu e sobre as características químicas do solo. Foram realizados dois experimentos, utilizando-se colunas de solo: no primeiro os vasos receberam adubação mineral (N e K) e os tratamentos com composto orgânico e biocarvão fresco ou oxidado com peróxido de hidrogênio. No segundo experimento foram empregados o composto orgânico e o biocarvão fresco ou oxidado com ácido nítrico, porém os vasos não receberam adubação mineral. Os tratamentos foram: T₁ - testemunha sem composto nem biocarvão; T₂ - 1% base peso de composto; T₃ - 0,75% de composto + 0,25% de biocarvão fresco; T₄ - 0,50% composto + 0,50% biocarvão fresco; T₅ - 0,25% composto + 0,75% biocarvão fresco; T₆ - 1% biocarvão fresco; T₇ - 0,75% de composto + 0,25% de biocarvão oxidado; T₈ - 0,50% composto + 0,50% biocarvão oxidado; T₉ - 0,25% composto + 0,75% biocarvão oxidado; T₁₀ - 1% biocarvão oxidado. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com cinco repetições. Para os dois experimentos foram realizadas avaliações da produção de massa seca total do capim Marandu em cinco cortes. Ao final de cada ensaio foram realizadas análises das características químicas do solo. Em geral, as diferentes misturas de biochar com composto apresentaram algum efeito positivo sobre todas as variáveis, sem destaque para nenhuma mistura. Por isso, o uso de mistura de proporções iguais de composto e biochar permite obter os benefícios próprios de cada material.

Palavras-chave: biochar; pirólise; manejo do solo; acidez do solo; retenção de nutrientes.

ABSTRACT

The application of biochar has great potential to increase the levels of nutrients in the soil solution, favoring plant development. However, the isolated use of biochar with characteristics of low nutrient availability can be inefficient, especially in low fertility soils. In this context, the objective of this work will be to quantify the effects of the application of eucalyptus wood biochar and its mixture with organic compost on the biomass production of *Brachiaria brizantha* cv. Marandu and on soil characteristics. The organic and bio-oxidized compounds treatments with hydrogen peroxide. Organic compost or fresh biochar or oxidized with inorganic acid are not used, but the vessels are not a second mineral experiment. The treatments are: T₁ - Control without compost or biochar; T₂ - 1% compound weight basis; T₃ - 0.75% compound +0.25% fresh biochar; T₄ - 0.50% compost + 0.50% fresh biochar; T₅ - 0.25% compost + 0.75% fresh biochar; T₆ - 1% fresh biochar; T₇ - 0.75% compound +0.25% oxidized biochar; T₈ - 0.50% compound + 0.50% oxidized biochar; T₉ - 0.25% compound + 0.75% oxidized biochar; T₁₀ - 1% oxidized biochar. The experimental design is completely randomized with five replications. For the two experiments, estimates of total dry mass production of Marandu grass in five cuts will be presented. At the end of each test, the characteristics of the soil test will be performed. In general, as different mixtures of biochar with some difference between all variables, no positive effect for any mixture. Therefore, the use of a mixture of equal proportions of compost and biochar allows the benefits of each material.

Keywords: biochar; pyrolysis; soil management; soil acidity; nutrient retention.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1	Capim Mandaru: aspectos botânicos e agrônômico	11
2.2	Biocarvão	12
2.2.1	<i>Obtenção e propriedades dos biocarvões pirogênicos</i>	12
2.2.2	<i>Utilização e benefícios do biocarvão na agricultura</i>	14
2.2.3	<i>Interação entre biocarvões e adubação orgânica</i>	14
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	17
3.1	Local de estudo	17
3.2	Produção de biocarvão e de composto	17
3.3	Delineamento Experimental e Tratamentos	18
3.4	Produção de biomassa	20
3.5	Análises químicas do substrato	20
3.6	Análises estatísticas.....	21
4	RESULTADOS DE DISCUSSÃO.....	22
4.1	Produção de biomassa seca	22
4.2	Características do Solo	31
4.2.1	<i>pH</i>	31
4.2.2	<i>Matéria Orgânica</i>	31
4.2.3	<i>Teor de Fósforo</i>	40
4.2.4	<i>Teor de Potássio</i>	42
4.2.5	<i>Teor de Cálcio</i>	48
4.2.6	<i>Teor de Magnésio</i>	51

4.2.7	<i>Capacidade de troca de Cátions</i>	54
4.2.8	<i>Percentagem de Sódio Trocável</i>	58
5	CONCLUSÕES	61
	REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO

As cultivares da espécie *Brachiaria brizantha*, se tornaram as mais utilizadas em pastagens cultivadas no Brasil Central. Estima-se que na região do Centro-Oeste do Brasil, cerca de 50% das áreas estejam ocupadas pelo cultivo dessa espécie de gramínea (MACEDO, 2006). Já na região Norte do país, o cultivo se aproxima de cerca de 65% (DIAS FILHO; ANDRADE, 2005).

Uma das estratégias para enfrentar os problemas no manejo do solo é o uso do bicarvão ou biochar (LEHMANN *et al.*, 2003). O biochar é o produto resultante da pirólise da biomassa orgânica natural sob limitada presença de oxigênio ou ausência deste elemento, o qual tem potencial como condicionador de solo, melhorando suas propriedades físicas, químicas e biológicas (LAIRD *et al.*, 2010; PAZ-FERREIRO *et al.*, 2012; LONE *et al.*, 2015).

O carvão resultante do processo de pirólise é rico em carbono recalcitrante e tem grande potencial como condicionador do solo e/ou fertilizante. Ele resulta da carbonização de resíduos de biomassa, ou de culturas destinadas à sua produção, e pode ser produzido especificamente para aplicação ao solo, com objetivo ambiental e, ou agrônômico, por sua resistência à decomposição, alto teor de carbono e grande área superficial devido à porosidade, que é devida ao processo de queima (MADARI *et al.*, 2009; NÓBREGA, 2011). Entre os estudos que relatam o efeito da aplicação de carvão pirogênico sobre o solo e culturas, Jeffery *et al.* (2011), em ampla revisão sobre os efeitos do carvão pirogênico, verificaram que sua adição ao solo proporciona ganhos na produtividade das culturas, com um aumento médio de cerca de 10%, independentemente do tipo de matéria prima e da taxa de aplicação, o qual é atribuído à contribuição do carvão em aumentar o pH, a retenção de água e a disponibilidade de nutrientes.

A aplicação de biochar tem grande potencial de aumentar os teores de nutrientes na solução do solo. Isso ocorre devido à grande quantidade de nutrientes presentes no material utilizado em sua produção que se concentram durante o processo de pirólise. Além de melhorar a disponibilidade de nutrientes, devido à presença de cargas negativas na superfície do biochar (CTC), sua aplicação no solo aumenta a retenção e reduz a lixiviação de nutrientes (MÉNDEZ *et al.*, 2013; GAO *et al.*, 2016;). Entretanto, os benefícios proporcionados pelo biochar são mais expressivos quando o produto é combinado com solo fértil ou com adição de fertilizantes (STEINER *et al.*, 2007; PETTER *et al.*, 2012; LIMA *et al.*, 2015). O potencial do biochar como fonte de alguns nutrientes varia conforme as características químicas do material (MUKOME *et al.*, 2013). Assim, o uso isolado do biochar com características de baixa disponibilidade de

nutrientes pode ser ineficiente para o desenvolvimento vegetal conforme as condições de solo onde é aplicado (LIMA *et al.*, 2013; 2015).

Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi quantificar os efeitos da aplicação de biocarvão de madeira de eucalipto e de sua mistura com composto orgânico sobre a produção de biomassa de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu e sobre as características químicas do solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Capim Marandu: aspectos botânicos e agrônomico

Pertencente ao gênero *Brachiaria*, a *Brachiaria brizantha* (Hochstex A. RICH.) STAPF. cv. Marandu, é originária de uma região vulcânica da África, onde os solos geralmente apresentam bons níveis de fertilidade, com precipitação pluviométrica anual ao redor de 700 mm (Rayman, 1983). É uma gramínea perene originária que se adaptou muito bem no Brasil e vem sendo utilizada de norte a sul, dentro do território nacional. É uma gramínea muito resistente ao ataque de cigarrinhas das pastagens e que vegeta bem em locais com variação de temperatura entre 20°C e 30°. Quanto à fertilidade do solo, é medianamente exigente, mas responde muito bem com aumento na produção de biomassa. Dentre as *Brachiarias* a cultivar Mandarú é a mais representativa por sua aceitação pelos produtores e principalmente pelas suas características agronômicas.

O pasto de brachiaria é formado por uma população de perfilhos, considerados unidades básicas de crescimento das gramíneas e constituídos de uma série de fitômeros (lâmina foliar, bainha, lígula, nó, entrenó e gema axilar), os quais se diferenciam a partir de um único meristema. Com o pastejo ou o corte, a gramínea forrageira modifica a morfologia de seus perfilhos. Nesse sentido, sob desfolhação severa, os perfilhos passam a ser menores, mais leves e com órgãos (folhas e colmo) mais curtos. Com essas modificações morfológicas, as lâminas foliares podem continuar se desenvolvendo e realizar fotossíntese, sem que sejam acentuadamente removidas pelo animal em pastejo. Desse modo, o perfilhamento e a caracterização morfológica dos perfilhos individuais são essenciais para compreender os fatores que interferem na produção de forragem e na estrutura do dossel forrageiro (SOUSA *et al.*, 2012).

O capim marandu não suporta solos encharcados e é recomendado para áreas de média a boa fertilidade de solo, embora tolere acidez. Quando adequadamente manejado, o capim-marandu apresenta alta resposta à adubação e elevado potencial de produção de

forragem de até 36 t/ha.ano de massa seca (MS). Devido às suas características, existem no Brasil, 60 milhões de hectares de pastagens formadas com *Urochloa brizantha* cv. Marandu (capim-marandu), o que representa 65% da área de pastagem cultivada na região Norte e 50% na região Centro-Oeste.

Para melhorar o desenvolvimento das pastagens, reduzir a degradação e, portanto, aumentar a produtividade por hectare aumentando a alocação animal é necessário que seja feito um manejo adequado, realizando as correções e adubações necessárias para melhor desenvolvimento da cultura. Andrade *et al.* (2004), estudando o potencial da adubação nitrogenada para restauração da capacidade produtiva de uma pastagem de *Brachiaria brizantha* cv. Mandarú, a qual vinha apresentado queda progressiva de capacidade de suporte, concluíram que a adubação nitrogenada possui grande potencial para restauração de capacidade produtiva de pastagens exclusivas de gramíneas, bem como para a intensificação dos sistemas de produção animal a pasto.

A adubação orgânica feita através da utilização de vários tipos de resíduos, tais como: esterco curtido, vermicomposto de minhocas, compostos fermentados, biofertilizantes enriquecidos com micronutrientes e cobertura morta melhora as características químicas do solo, proporcionando assim maior rendimento pela cultura além de ser uma fonte de adubação mais barata. A mesma diferencia-se da adubação convencional por ser de liberação lenta, tendo, em contrapartida, uma ação mais prolongada, além de favorecer a formação e estruturação da microflora no solo. É a melhor forma de fornecer N na fase do plantio, principalmente, quando se utiliza o manejo convencional, pois as perdas são mínimas; além disso, estimula o desenvolvimento das raízes (SILVA; SIMIONI; LECENA, 2013). A adubação orgânica também pode aumentar o teor de matéria orgânica e de nutrientes no solo (LIMA, 2007).

2.2 Biocarvão

2.2.1 Obtenção e propriedades dos biocarvões pirogênicos

O termo genérico pirólise (do grego pyros = fogo e lyses = quebra) é utilizado principalmente em tecnologias de conversão termoquímica de biomassa. A pirólise é um processo de decomposição térmica, em temperaturas entre 400 °C e 800 °C, na ausência total ou parcial de oxigênio, convertendo a matéria-prima da biomassa em carvão (sólido), alcatrão (combustível líquido) e gás, contendo CO, CO₂, H₂, CH₄ e outros hidrocarbonetos (NÓBREGA, 2011).

O carbono pirogênico resulta da carbonização (pirólise) parcial ou total, principalmente de materiais ligno-celulósicos, sendo composto de unidades poliaromáticas condensadas, deficientes em hidrogênio e com diferentes tamanhos e níveis organizacionais (KRAMER *et al.*, 2004). Esse material está presente em diversos ambientes e possui propriedades de grande interesse ambiental e agrônômico, tais como: (a) alta estabilidade, devido à presença de estruturas aromáticas condensadas, o que confere importante papel no sequestro de carbono; (b) elevada reatividade, decorrente da oxidação parcial de sua estrutura aromática, dando origem a grupos funcionais ácidos e recalcitrantes, principalmente carboxílicos, que contribuem para o aumento da capacidade de troca catiônica, especialmente em solos altamente intemperizados, constituídos por minerais de baixa atividade e (c) elevada porosidade e área superficial, sendo refúgio para micro-organismos, tais como micorrizas, que produzem mucopolissacarídeos importantes para a agregação dos solos e que, em associação com o sistema radicular das plantas, podem aumentar a capacidade de absorção destas (CUNHA *et al.*, 2009).

O carvão pirogênico constitui uma forma altamente recalcitrante de carbono orgânico devido a sua estrutura poliaromática, sendo resistente à oxidação termal, química e fito-oxidação. Embora sofra alguma degradação no ambiente, sua incorporação ao solo é um mecanismo importante no sequestro de carbono, principalmente em solos tropicais, sujeitos às condições climáticas que favorecem a mineralização da matéria orgânica e onde a fração argila dos solos apresenta baixos valores de CTC (NOVOTNY *et al.*, 2007; PAZ; SOUZA, 2010).

A pirólise a temperaturas relativamente baixas, entre 300°C e 500°C, altera as propriedades químicas do carbono da biomassa, formando estruturas mais resistentes à degradação pelos micro-organismos do solo, em comparação com o material original. A pirólise lenta proporciona maior rendimento de carvão (NOBREGA, 2011). Por isso, materiais orgânicos que seriam rapidamente decompostos, permitindo a liberação de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases responsáveis pelo aumento do efeito estufa, são transformados em carvão pirogênico, que se degrada lentamente, criando no solo um estoque de carbono de longo prazo (MANGRICH *et al.*, 2011).

A ideia do uso do carvão pirogênico, ou seja, do carvão proveniente da biomassa, surgiu de estudos da matéria orgânica das Terras Pretas de Índios (TPI), solos amazônicos antropogênicos com excelentes características agrônômicas e ambientais, alta fertilidade e alto conteúdo de carbono estável em sua fração orgânica, o que forneceu um modelo de solo adequado ao sequestro de carbono (NOVOTNY, 2009). O carvão pirogênico é um material

adequado para se reproduzir o modelo TPI, por apresentar grupos aromáticos condensados, que garantem sua recalcitrância (resistência à degradação química), tendo potencial como material eficiente para sequestro de carbono e condicionador do solo, pois melhora características relativas à absorção de água e penetração de raízes (MAIA, 2010).

As propriedades físicas e químicas específicas do carvão pirogênico, tais como alta porosidade (LIANG *et al.*, 2006), que auxilia na retenção de água (Lehmann *et al.*, 2003) e a natureza particulada (SKJEMSTAD *et al.*, 1996; LEHMANN *et al.*, 2005), combinadas com a estrutura química específica (BALDOCK; SMERNIK, 2002) promovem maior resistência à degradação microbiana do que outros compostos orgânicos (SHINDO, 1991; CHENG *et al.*, 2008).

Em relação à densidade, importante característica física do carvão pirogênico, Pastor-Villegas *et al.* (2006) observaram que, mesmo produzido a partir de diferentes tipos de madeiras e em diferentes tipos de fornos tradicionais, ele apresenta densidade específica entre $0,30 \text{ g cm}^{-3}$ e $0,43 \text{ g cm}^{-3}$. A resistência mecânica do carvão pirogênico está relacionada à sua densidade e é uma característica usada para definir a qualidade do carvão ativado, no que se refere à sua capacidade de resistir ao desgaste durante o uso; o mesmo pode ser atribuído ao carvão pirogênico (AYGUN *et al.*, 2003).

A porosidade do carvão pirogênico é responsável pela maior parte das superfícies de cargas reativas. As estruturas periféricas reativas podem ser hidrofílicas, hidrofóbicas, altamente ou parcialmente reativas, sendo essa variação em função da eletronegatividade de grupos funcionais que se ligam ao carbono das estruturas aromáticas, tais como OH, NH₂, OR ou O (C=O) R, o que gera uma heterogeneidade química de superfície (BRENNAN *et al.*, 2001).

A partir do modelo do solo com estrutura e propriedades conhecidas, é possível encontrar materiais e técnicas que possam reproduzi-lo através de práticas agrícolas (NOVOTNY *et al.*, 2009). Assim sendo, qualquer fonte de biomassa carbonizada para uso no solo com finalidade de sequestrar carbono e aumentar a qualidade agrônômica do solo pode ser considerado carvão pirogênico. Essa tecnologia tem potencial global de sequestro de CO₂ atmosférico da escala de bilhões de toneladas no espaço de 30 anos. No entanto, os resultados publicados se referem a estudos de uso em pequena escala, impedindo generalizações para diferentes regiões geográficas e tipos de carvão vegetal (SOHI *et al.*, 2010).

2.2.2 Utilização e benefícios do biocarvão na agricultura

Alguns estudos têm mostrado a eficácia do uso do biochar na agricultura, principalmente por sua característica de diminuir a lixiviação dos nutrientes e de água no solo (LEHMANN, 2007; LEHMANN; JOSEPH, 2009), o que garante maior eficiência de uso dos nutrientes pelas plantas e auxilia a redução dos gastos com adubações químicas. Além disso, o produto atua como estoque de C no solo e contribui para diminuir a concentração de CO₂ na atmosfera, favorecendo a mitigação das mudanças climáticas globais (LEHMANN; JOSEPH, 2009).

O aumento da fertilidade do solo causado pela adição do biocarvão é geralmente associado com alterações físicas e químicas nas características do mesmo (LAIRD *et al.*, 2010). O Biochar apresenta estrutura interna inerte, semelhante ao grafite, que faz preservar (sequestrar) o carbono no solo por centenas e até milhares de anos, e estrutura periférica externa reativa (funcionalizada) para atuar como matéria orgânica natural do ambiente.

Tendo em vista que a superfície específica do solo é uma característica muito importante, uma vez que influencia todas as funções essenciais para a fertilidade do mesmo, incluindo os ciclos de água, ar e dos nutrientes e a atividade microbológica (BAILEY *et al.*, 2011), o biocarvão pode atuar da mesma forma que a matéria orgânica, graças à sua superfície específica maior que à da areia e igual ou superior à da argila, proporcionando um aumento líquido da superfície específica do solo quando adicionado a este (NÓBREGA, 2011).

2.2.3 Interação entre biocarvões e adubação orgânica

A alta capacidade de troca de cátions (CTC; 40–80 cmol kg⁻¹) e alta superfície específica (51–900 m² g⁻¹) são características benéficas do carvão pirogênico para aplicação ao solo, com benefícios similares aos conferidos pela aplicação de matéria orgânica. No contexto das mudanças climáticas, o uso de carvão pirogênico é uma proposta de manejo sustentável, pois melhora propriedades químicas (CTC, pH, disponibilidade de nutrientes), físicas (retenção de água e densidade) e biológicas (atividade microbiana) do solo, além de sequestrar carbono. Alguns benefícios apregoados da aplicação de carvão pirogênico são aumento na produtividade das culturas, redução em frequência e lâmina de água e custos de irrigação e economia de combustível devido à redução na resistência do solo aos implementos de preparo (STREUBEL *et al.*, 2011; PEAKE *et al.*, 2014).

A adubação orgânica é feita através da utilização de vários resíduos, tais como: esterco curtido, vermicomposto de minhocas, compostos fermentados, biofertilizantes enriquecidos com micronutrientes e cobertura morta. A mesma diferencia-se da adubação convencional por ser de liberação lenta, tendo, em contrapartida, uma ação mais prolongada, além de favorecer a

formação e estruturação da microflora no solo. É a melhor forma de fornecer N na fase de plantio, principalmente, quando se utiliza manejo convencional, pois as perdas são minimizadas; além disso, estimula o desenvolvimento das raízes (SILVA; SIMIONI; LECENA, 2013). Como também, a adubação orgânica pode aumentar o teor de matéria orgânica no solo (LIMA, 2007).

A compostagem é um processo de transformação biológica que pode ser utilizado para transformar diferentes tipos de resíduos orgânicos em fertilizantes que, quando adicionados ao solo, melhoram as suas características físicas, químicas e biológicas (LIMA, 2004). Consequentemente, o composto serve para enriquecer solos pobres, melhorando a sua estrutura e permitindo uma boa fertilidade, também aumentando a capacidade das plantas na absorção de nutrientes, fornecendo substâncias que estimulam seu crescimento (PARÁ, 2003). A importância da ciclagem de nutrientes através do uso ampliado de compostos orgânicos é cada vez mais reconhecida (ROY *et al.*, 2002; RÖMER, 2009; FISCHER; GLASER, 2012).

A compostagem tem sido uma estratégia muito utilizada pelos agricultores, por centenas de anos, no aproveitamento de resíduos para a produção de composto orgânico. Além de promover a adição de matéria orgânica ao solo, esta técnica é realizada para aumentar a produção agrícola e a qualidade do solo, causando menos impacto (JIMÉNEZ BECKER *et al.*, 2010).

Apesar do menor custo, os adubos orgânicos disponibilizam os nutrientes de forma lenta, dependendo basicamente de fatores que influenciam o processo de mineralização da matéria orgânica como temperatura, água e relação carbono: nitrogênio do resíduo (CANTARELLA, 2007).

O uso da matéria orgânica como fertilizante, proporciona efeitos significativos na recuperação de solos esgotados e degradados (EMBRAPA, 2016). Isso ocorre devido a matéria orgânica atuar no aumento da retenção de água e nutrientes, do equilíbrio do pH e da temperatura, facilita o arejamento do solo, aumenta a sua plasticidade (CATITA, 2013).

Interações entre o biocarbão e fertilizantes orgânicos têm sido associadas ao aumento do conteúdo de carbono orgânico do solo, o que pode melhorar a capacidade de retenção de nutrientes por meio do aumento da CTC e da formação de complexos organo-minerais (Glaser *et al.*, 2002), além de melhorar a capacidade de adsorção de substâncias fitotóxicas (HILLE E DEN OUDEN, 2005; SCHULZ; GLASER, 2012).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local de estudo

A pesquisa foi realizada em uma casa de vegetação (ambiente protegido) da Unidade Acadêmica Especializada em Ciências Agrárias da Universidade Federal do Rio Grande do Norte-UFRN, localizada na Escola Agrícola de Jundiáí, em Macaíba-RN (5°53'35" S e 35°21'47" W). A casa de vegetação possui cobertura em arco, com 6,4 m de largura, 18 m de comprimento e pé direito de 3,0 m, coberta com filme de polietileno de baixa densidade com aditivo anti-ultravioleta e espessura de 150 μ m, protegida nas laterais com malha negra 50%.

A coleta das amostras do solo utilizado foi realizada na camada de 0 a 20 cm, em área de NEOSSOLO QUARTZARÊNICO de textura arenosa, localizada na Escola Agrícola de Jundiáí. O solo usado nos experimentos passou por uma peneira com malha de 4 mm e apresentou as seguintes características físico-químicas (tabela 1):

Tabela 1 Características do solo utilizado nos experimentos

CE	pH	MOS	P	K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Al ⁺³	AT*	CTC	PST	Areia grossa	Areia fina	Areia total	Silte	Argila
dS m ⁻¹	---	gkg ⁻¹	-----mg dm ⁻³ -----					-----cmol dm ⁻³ -----	-----					-----kg kg ⁻¹ -----		
0,23	6,0	6,56	4,97	26,27	73,2	0,95	0,1	0,0;	0,17	1,55	20,6.	0,74	0,16	0,9	0,03	0,07

*AT: Acidez trocável

3.2 Produção de biocarvão e de composto

O biocarvão utilizado nos experimentos foi produzido por carbonização de madeira de eucalipto híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em forno de alvenaria, com temperatura variando de 100 °C, no início, a 450 °C, no final da carbonização. O Laboratório de Tecnologia da Madeira e Energia da Biomassa Florestal da UFRN foi o local onde foram realizadas as análises do biocarvão, segundo as metodologias descritas por Pimenta *et al.* (2009) e Figueiredo (2011), sendo obtidas as seguintes características: densidade, umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. Os teores de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e sódio do biocarvão foram determinados no LASAP - UFRN. Após a produção, o biocarvão foi triturado e passado em peneira com malha de 60 mesh, para ser utilizado na oxidação.

A oxidação do biocarvão foi realizada utilizando-se peróxido de hidrogênio ou ácido

nítrico. Para isso foram adicionados 40 g do carvão triturado em um balão de vidro de fundo chato, com capacidade para 1 L. Foram usados 250 g de peróxido de hidrogênio à concentração de 30% e 150 mL de água destilada e, em seguida, o pH da solução foi corrigido para 8, com auxílio de uma solução de hidróxido de sódio à 50%. O balão volumétrico foi posicionado em um agitador magnético e aquecido até atingir a temperatura de 80 °C. Depois de alcançada a temperatura desejada, a solução foi mantida em agitação durante 4 h. No caso do ácido nítrico foram usados 300 mL deste produto na concentração de 25%, com 262,5 mL de água. O balão foi aquecido em capela e colocado em um sistema de refluxo por 4 horas após o início da fervura. Após o final dos dois processos foram adicionados 600 ml de água destilada e realizado o processo de filtragem, com auxílio de uma bomba de vácuo acoplada a um funil Buncher e filtros de papel com porosidade média de 20 µm. Os filtros com o carvão foram colocados em estufa à 60 °C durante 24 h. Em seguida, foi realizada a raspagem dos filtros e o armazenamento do carvão vegetal.

O composto orgânico foi produzido em leiras ou pilhas construídas manualmente, com revolvimento a cada três dias e irrigadas diariamente. As pilhas tinham entre 1,5 e 3,0 m de base, 1,6 m de altura e um comprimento dependente da quantidade de material e formato do pátio de compostagem. As pilhas foram compostas por 70% de material palhoso (restos de culturas, de podas e de roçagem de áreas vegetadas) e 30% de esterco bovino, dispostos em camadas. Durante o processo, a temperatura foi verificada por termômetro e mantida entre 55 e 70 °C.

Os teores de nutrientes minerais do biocarvão e do composto orgânicos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 Teores de alguns nutrientes contidos no biocarvão e no composto orgânico usados em combinações para a produção de Marandu.

	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Zn	Cu
	-----g kg ⁻¹ -----						-----mg kg ⁻¹ -----			
Biocarvão	3,2	2,5	4,6	7,3	2,2	0,8	1300	32	43	7
Composto	7,0	3,3	7,0	13,1	7,5	0,5	1683	78	85	13

O N do composto foi determinado após digestão sulfúrica e quantificado pelo método Kjeldhal; os demais nutrientes foram determinados após digestão seca no material seco em estufa a 65°C e quantificados por espectrofotometria para P, fotometria de chama para K e em espectrofotômetro de absorção atômica para os outros nutrientes (SILVA, 2009).

3.3 Delineamento Experimental e Tratamentos

Os dois experimentos foram desenvolvidos em ambiente protegido, utilizando-se tubos de PVC com diâmetro de 150 mm e altura de 200 mm, em delineamento inteiramente

casualizado com cinco repetições. No primeiro experimento, todos os vasos receberam adubação mineral de cobertura em quatro aplicações, totalizando o equivalente a 160 kg ha⁻¹ de N e 100 kg ha⁻¹ de K₂O. Neste experimento foram testadas as misturas de composto orgânico com biocarvão fresco ou oxidado com peróxido de hidrogênio. No segundo experimento, nenhum vaso recebeu adubação mineral e foram testadas as mesmas misturas do primeiro experimento, porém o biocarvão foi aplicado fresco ou oxidado com ácido nítrico. A dose completa de biocarvão e de composto foi equivalente a 24 t ha⁻¹, sendo que a quantidade por vaso foi calculada em função do volume útil do vaso (tubo de PVC), considerando-se que um hectare tem um volume de 2.000 m³ na camada de 0 a 20 cm.

Os tratamentos foram os seguintes:

Experimento 1:

T1 – testemunha sem composto nem biocarvão;

T2 - 10 g de composto kg⁻¹ de solo;

T3 - 7,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 2,5 g de biocarvão fresco kg⁻¹ de solo;

T4 - 5,0 g de composto kg⁻¹ de solo + 5,0 g de biocarvão fresco kg⁻¹ de solo;

T5 - 2,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 7,5 g de biocarvão fresco kg⁻¹ de solo;

T6 - 10 g de biocarvão fresco kg⁻¹ de solo;

T7 - 7,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 2,5 g de biocarvão oxidado com peróxido de hidrogênio kg⁻¹ de solo;

T8 - 5,0 g de composto kg⁻¹ de solo + 5,0 g de biocarvão oxidado com peróxido de hidrogênio kg⁻¹ de solo;

T9 - 2,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 7,5 g de biocarvão oxidado com peróxido de hidrogênio kg⁻¹ de solo;

T10 – 10 g de biocarvão oxidado com peróxido de hidrogênio por kg de solo.

Experimento 2:

T1 – testemunha sem composto nem biocarvão;

T2 - 10 g de composto kg⁻¹ de solo;

T3 - 7,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 2,5 g de biocarvão fresco kg⁻¹ de solo;

T4 – 5,0 g de composto kg⁻¹ de solo + 5,0 g de biocarvão fresco kg⁻¹ de solo;

T5 - 2,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 7,5 g de biocarvão fresco kg⁻¹ de solo;

T6 - 10 g de biocarvão fresco kg⁻¹ de solo;

T7 - 7,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 2,5 g de biocarvão oxidado com ácido nítrico kg⁻¹ de solo; T8 - 5,0 g de composto kg⁻¹ de solo + 5,0 g de biocarvão oxidado com ácido nítrico kg⁻¹

de solo; T9 - 2,5 g de composto kg^{-1} de solo + 7,5 g de biocarvão oxidado com ácido nítrico kg^{-1} de solo; T10 - 10 g de biocarvão oxidado com ácido nítrico kg^{-1} de solo.

O volume preenchido com solo em cada tubo de PVC foi de $3,353 \text{ dm}^3$. Esses tubos foram abertos no fundo, o qual foi protegido externamente com tecido não tecido (TNT) de polipropileno. Os vasos foram preenchidos até a altura de 20 cm com 4,4 kg de solo mais a quantidade calculada de cada material da mistura, conforme cada tratamento.

As sementes de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu produzidas por R & R Sementes foram adquiridas em estabelecimento comercial especializado. Após o desbaste foram mantidas três plantas por vaso. A quantidade de água adicionada via irrigação foi determinada por diferença entre a massa em cada dia de vasos sem plantas e a capacidade de retenção de água nos vasos determinada conforme Kammann *et al.* (2011) que a consideram como sendo o conteúdo volumétrico de água no solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) ao cessar a drenagem.

3.4 Produção de biomassa

Em cada experimento foram realizados cinco cortes da parte aérea das plantas a 10 cm acima da superfície do solo com intervalos de 35 dias entre cada corte. Em cada corte foi determinada a massa seca da parte aérea das plantas após secagem da biomassa cortada, que foi realizada em estufa de circulação forçada de ar na temperatura de $65 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 72 horas.

3.5 Análises químicas do substrato

Após o quinto corte de cada experimento todo o solo de cada vaso foi seco ao ar e peneirado em malha de 2,0 mm para obter a terra fina seca ao ar. As metodologias descritas em TEIXEIRA *et al.* (2017) foram usadas para as seguintes determinações: pH do solo, que foi realizada potenciométricamente por meio de eletrodo combinado imerso em suspensão solo-água na proporção de 1:2,5; matéria orgânica, determinada a partir do carbono orgânico do solo, determinado por reação de oxidação via úmida com dicromato de potássio em meio sulfúrico e titulação com sulfato ferroso amoniacal; os cátions trocáveis Ca^{2+} e Mg^{2+} , extraídos com solução de KCl 1 mol L^{-1} e quantificados por espectrofotometria de absorção atômica, enquanto que K^+ , Na^+ e P são extraídos por meio da solução de Mehlich-1 ($\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$), sendo K^+ e Na^+ quantificados por espectrofotometria de chama e P por colorimetria; acidez potencial ($\text{H}^{++} \text{ Al}^{3+}$), extraída com solução tamponada de acetato de cálcio e

quantificada por titulação com NaOH; soma de bases (SB), obtida pela soma dos teores de cátions trocáveis (Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; K^+ e Na^+); capacidade de troca catiônica (CTC), calculada pela soma: $\text{SB} + (\text{H}^{++} \text{Al}^{3+})$; e percentagem de sódio trocável (PST), calculada pela equação: $(\text{Na}/\text{CTC}) \times 100$.

3.6 Análises estatísticas

Os dados foram inicialmente submetidos à Estatística Descritiva e ao teste de Shapiro Wilk ($p < 0,05$), que foi usado para verificar o ajuste dos dados à distribuição Normal. As variáveis cujos dados não se ajustaram à distribuição Normal tiveram seus dados submetidos às seguintes transformações: raiz quadrada de x , raiz quadrada de $x+0,5$, raiz quadrada de $x+1$, log de x . em seguida, os dados foram submetidos à análise de variância, na qual a fonte de variação foram os tratamentos, cujo efeito foi verificado por meio do teste F ($p < 0,05$). Quando foi constatado efeito significativo dos tratamentos, foi realizada a comparação das médias por meio do teste de Tukey ($p < 0,05$). Para isso foi utilizado o Software estatístico SISVAR (FERREIRA, 2014).

Os resultados da análise de variância das variáveis foram apresentados com os dados não transformados quando, após a transformação dos dados para possibilitar o ajuste à distribuição normal, não foi verificada alteração do nível de significância do teste F, nem alteração no ranking da comparação de médias pelo teste de Tukey. Esse procedimento é reportado por Ribeiro-Oliveira *et al.* (2018).

4. RESULTADOS DE DISCUSSÃO

4.1 Produção de biomassa seca

A produção de biomassa seca da parte aérea (BSPA) do capim Marandu apresentou efeito significativo dos tratamentos nos dois experimentos (Tabela 2). A média desta variável foi 2,6 vezes maior no experimento 1, que recebeu adubação química com nitrogênio e potássio, do que no experimento 2, que não recebeu adubação química.

Tabela 3. Resumo da análise de variância para a produção de biomassa seca da parte aérea-BSPA (g por vaso) de cinco cortes do capim Marandu sob efeito de misturas de biochar e composto nos experimentos 1 e 2

Fontes de Variação	Experimento 1			Experimento 2		
	Graus de liberdade	Quadrado médio	Valor F	Graus de liberdade	Quadrado médio	Valor F
Tratamentos	9	180,86	28,28**	9	42,19	17,94**
Erro	40	6,40		40	2,35	
Total	49			49		
¹ CV (%)		7,78			12,20	
Média		32,50			12,57	

¹Coefficiente de variação. **significativo (p<0,01).

A discussão do efeito altamente significativo dos tratamentos sobre a produção de biomassa do capim Marandu nos dois experimentos é feita por estudo de Latawiec *et al.* (2019), com *Brachiaria*, no qual tanto biochar como adubo mineral aumentaram significativamente a biomassa da parte aérea em colheitas sucessivas. Neste estudo, os maiores aumentos obtidos com a aplicação de biochar em relação à testemunha, sem adubo ou biochar, foram atribuídos a aumentos indiretos na fertilidade do solo, como a correção da acidez do solo e o fornecimento de P e K. Enquanto isso, Lima (2015), observaram maiores efeitos sobre o desenvolvimento e produtividade de plantas quando se usou a combinação de biochar com um fertilizante mineral do que quando eles foram usados isoladamente. Esses resultados reforçam a hipótese de que o biochar isoladamente não atende todas as necessidades da produção vegetal. Por sua vez, Van Zwieten *et al.* (2010) observaram um aumento de 2,5 vezes na biomassa das plantas de trigo quando foi aplicado biochar mais adubação mineral a um Latossolo ácido e citam outros estudos que obtiveram grandes aumentos em produtividade de culturas quando foi aplicado biochar com adubação mineral em solos tropicais ácidos e altamente intemperizados. Em uma meta análise em escala global, Jeffery *et al.* (2017) observaram aumento médio de 25% em produtividade de diversas culturas em regiões tropicais devido à correção da acidez dos solos com baixo pH e ao fornecimento de nutrientes aos solos com baixa fertilidade e com pequeno uso de fertilizantes. Entretanto, não foi observada influência da aplicação do biochar em regiões temperadas.

Os resultados de BSPA do experimento 1 (Figura 1A) indicam que os tratamentos T6 (1% biochar fresco), T9 (0,25% composto + 0,75 biochar oxidado) e T10 (1% biochar oxidado) não diferiram estatisticamente da testemunha (T1). Nesse experimento, os menores valores absolutos de BSPA foram obtidos pela testemunha e pelo tratamento T10. O menor valor absoluto de biomassa no experimento 2 (Figura 1B) foi obtido pela testemunha, que não diferiu estatisticamente dos tratamentos T5 e T6, que continham as maiores percentagens de biochar fresco (0,75 e 1,0%).

Os menores valores absolutos de BSPA no experimento 1, obtidos pela testemunha, que não recebeu nenhum produto, e pelo tratamento T10, que recebeu 1% de biochar, indicam que elevadas doses de biochar podem resultar em diminuição em curto prazo na disponibilidade de nutrientes devido a sua capacidade de adsorver e reter nitrogênio e outros nutrientes essenciais, como potássio, e isso pode prejudicar o crescimento, produtividade e qualidade das plantas. A forte afinidade do biochar por amônia e nitrato faz com que a aplicação de grandes doses de Biochar reduza a disponibilidade de N no solo e anule o efeito da aplicação de adubo nitrogenado mineral, como pode ter ocorrido com o T10 em nosso estudo (ASAI *et al.*, 2009; ALBUQUERQUE *et al.*, 2013; BASS *et al.*, 2016; KAMMANN *et al.*, 2018; KAVITHA *et al.*, 2018).

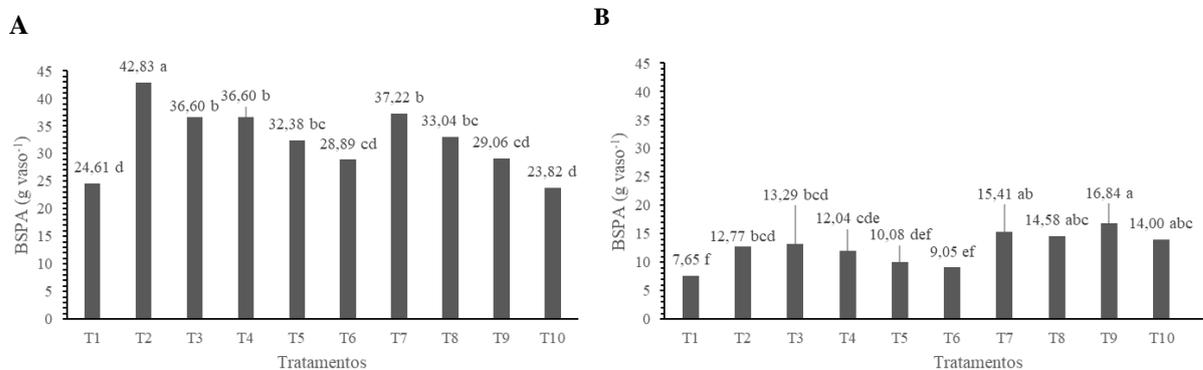


Figura 1. Biomassa seca da parte aérea (BSPA) de cinco cortes do capim Marandu sob efeito de misturas de biochar e composto no experimento 1 (A), que recebeu adubação química, e no experimento 2 (B), sem adubação química. T1: Testemunha sem aplicação de composto e biochar; T2: 10 g de composto kg^{-1} de solo; T3: 7,5 g de composto kg^{-1} de solo + 2,5 g de biochar fresco kg^{-1} de solo; T4: 5,0 g de composto kg^{-1} de solo + 5,0 g de biochar fresco kg^{-1} de solo; T5: 2,5 g de composto kg^{-1} de solo + 7,5 g de biochar fresco kg^{-1} de solo; T6: 10 g de biochar fresco kg^{-1} de solo; T7: 7,5 g de composto kg^{-1} de solo + 2,5 g de biochar oxidado kg^{-1} de solo; T8: 5,0 g de composto kg^{-1} de solo + 5,0 g de biochar oxidado kg^{-1} de solo; T9: 2,5 g de composto kg^{-1} de solo + 7,5 g de biochar oxidado kg^{-1} de solo; T10: 10 g de biochar oxidado kg^{-1} de solo.

Por sua vez, no experimento 2, que não recebeu adubo mineral, a obtenção do menor valor absoluto de BSPA pela testemunha, sem diferença estatística com os tratamentos T5 e T6, que continham as maiores percentagens de biochar fresco, também indica a imobilização do N no solo após a aplicação de biochar, diminuindo a disponibilidade e absorção de N pelas plantas e prejudicando seu crescimento. A alta relação C/N do biochar tem papel importante neste processo. Um grande aumento na biomassa microbiana do solo é promovido pela mineralização rápida da fração mais lábil do carbono do biochar além de compostos voláteis nele presentes (ASAI *et al.*, 2009; NELSON *et al.*, 2011; LI; CHAN, 2019). A diminuição na massa seca de alfafa, à medida que a dose de biochar aumentou acima de 0.5 % (base peso, observada por

Kim *et al.* (2015), foi atribuído a menor disponibilidade ou deficiência de alguns nutrientes, como o nitrogênio disponível, que se ligaram à superfície do biochar.

No experimento 1, que recebeu adubação química, os tratamentos com a dose mais alta de biochar, oxidado ou não, foram semelhantes à testemunha. No experimento 2 que não recebeu adubação química foram os tratamentos contendo as maiores proporções de biochar fresco que foram semelhantes a testemunha. Isso pode ser devido a que, o biochar que foi oxidado recebeu HNO_3 , que proporcionou mais nitrogênio em relação ao biochar fresco (MIA *et al.*, 2017; SAHIN *et al.*, 2017). Os tratamentos contendo as maiores percentagens de biochar fresco teriam prejudicado o crescimento e a produtividade das plantas devido à imobilização de nutrientes que poderiam estar na solução do solo (Schmidt *et al.*, 2015). Em trabalho de Albuquerque *et al.* (2013) a aplicação de biochar causou redução na disponibilidade de N e de Mn e de suas concentrações nas plantas. Isso é atribuído a que o biochar tem como característica ter baixo teor de N, ter alta capacidade de adsorção e o N contido nele ser mineralizado muito lentamente.

A maior produção de biomassa no experimento 1 foi observada no tratamento T2, que recebeu 1% de composto e que foi superior a todos os outros. No experimento 2, o maior valor absoluto de BSPA foi obtido pelo tratamento T9, que recebeu 0,75% de biochar oxidado com ácido nítrico. Este tratamento não diferiu estatisticamente dos outros tratamentos que receberam biochar oxidado, mas apresentou BSPA 120% maior do que a testemunha e foi significativamente superior aos tratamentos que receberam biochar fresco. No experimento 2 o T9 foi melhor porque aliou o fornecimento de nitrogênio devido à oxidação com HNO_3 com nutrientes fornecidos pelo composto após mineralização, nutrientes que não foram fornecidos pelo tratamento T10, que só recebeu biochar, pobre em nutrientes.

Os tratamentos que receberam biochar fresco, no experimento um, apresentaram ligeira superioridade em termos de BSPA (9%) em relação aos tratamentos que receberam biochar oxidado com H_2O_2 . A BSPA do capim Marandu do experimento 2 apresentou os maiores valores (Figura 1) nos tratamentos que usaram biochar oxidado com HNO_3 (T6 a T10), os quais apresentaram média de $15,21 \text{ g vaso}^{-1}$, que era 37% maior do que a média dos tratamentos que usaram biochar fresco ($11,11 \text{ g vaso}^{-1}$).

Quando se observa os resultados das misturas de biochar com composto, no experimento um foi verificada uma tendência de maiores MOS dos tratamentos com 0,75 e 0,50% de composto, além do uso de somente composto. A tendência de melhor resultado dos tratamentos contendo 0,75 e 0,50% de composto no experimento dois foi observada apenas nos tratamentos que receberam biochar fresco, enquanto entre os tratamentos que receberam

biochar oxidado foi observada superioridade do T9, que recebeu 0,75% de biochar, mas não diferiu de T7, T8 e T10. Isso pode confirmar o fornecimento de nitrogênio pelo biochar oxidado no experimento 2.

Os resultados do presente estudo também indicam a importância de alguma proporção de composto na mistura para o aumento da massa seca do capim Marandu. Neste sentido, Agegnehu *et al.* (2015, 2016) destacaram o efeito positivo sobre o crescimento e produtividade de plantas quando fertilizantes orgânicos foram aplicados junto com adubação mineral. Segundo os autores os fertilizantes orgânicos melhoram a capacidade de retenção de água e nutrientes pelo solo, além do aporte de nutrientes em relação à aplicação de apenas fertilizante mineral. Segundo Valarini *et al.* (2009), a aplicação de materiais orgânicos ao solo agrícola melhora seu estado nutricional e também promove efeitos positivos sobre outras propriedades, como agregação do solo, capacidade de retenção de água e aeração. Desta maneira, pode-se obter maiores produtividades com pequena ou nenhuma aplicação de fertilizantes. Além disso, as práticas agrícolas baseadas no uso de materiais orgânicos, como o composto, melhoram a qualidade do solo pelos benefícios ao crescimento, diversidade e atividade de diversos grupos de microrganismos radiculares, que promovem o crescimento vegetal.

Quando se comparou os tratamentos que receberam a mesma proporção (0,5%) de composto e de biochar, fresco (T4) ou oxidado (T8), não foi verificada diferença estatística nos dois experimentos, porém o T4 apresentou menor BSPA do que o T8 no experimento dois.

A semelhança estatística, em termos de BSPA, entre a testemunha e os tratamentos que receberam as maiores doses de biochar, oxidado ou não, pode ter sido devida ao entupimento dos poros do solo pela grande quantidade de biochar aplicada, ou porque a testemunha e esses tratamentos com biochar não tenham fornecido nutrientes adicionais em prazo mais curto, o que é proporcionado pelo composto quando mineraliza. Segundo Nóbrega (2011), o bloqueio dos poros do solo pelas partículas mais finas do biochar dificultam o movimento de água, ar e das raízes das plantas. Além disso, os tratamentos que apresentam grande conteúdo de biochar oxidado tem capacidade em reter e, ou imobilizar os nutrientes do solo e os nutrientes liberados pelo adubo e pelo composto, principalmente o N. Segundo Kavitha *et al.* (2018) é possível que o biochar reaja com nutrientes do solo e se comporte como receptor e não como fornecedor de nutrientes para as plantas. Desta maneira, quando se aplica biochar a um solo adubado, a tendência ao equilíbrio promoverá a ligação dos nutrientes aos sítios reativos do biochar, que é pobre em nutrientes (KAMMANN *et al.*, 2018).

A análise dos resultados dos tratamentos que receberam 1,0% de composto ou somente biochar no experimento um, que recebeu adubação mineral, indica que a BSPA foi significativamente maior para o tratamento T2, que recebeu somente composto. Como citado acima, a mineralização do composto fornece nutrientes a curto prazo que complementam a adubação química, enquanto os tratamentos que receberam somente biochar, fresco (T6) ou oxidado (T10), não diferiram entre si porque o efeito do biochar não ocorre em curto prazo. No experimento dois, que não recebeu adubação química, o tratamento que recebeu somente composto (T2) apresentou maior BSPA do que o tratamento que recebeu apenas biochar fresco. Entretanto, o T2 apresentou menor BSPA do que o tratamento que recebeu apenas biochar oxidado que forneceu nitrogênio, sem haver diferença significativa entre eles.

A superioridade da BSPA do T2, com 1% de composto, no experimento um, corrobora a vantagem dos adubos orgânicos sobre os minerais, na nutrição de *Brachiaria brizantha*, observada em estudo de Ribeiro Júnior *et al.* (2015). Segundo Orrico Júnior *et al.* (2018), a adubação orgânica é uma alternativa para reduzir o uso de fertilizantes minerais em pastagens mantendo a produtividade das gramíneas. Para isso são necessárias altas doses de composto orgânico devido a eles liberarem nutrientes lentamente para as plantas. Entretanto, essa liberação lenta diminui as perdas por lixiviação de nutrientes como o N. Em estudo de Schulz e Glaser (2012) a aplicação de composto puro promoveu o melhor desempenho agrícola, seguido da mistura de biochar e composto, como é o caso de alguns tratamentos estudados por nós. Segundo esses autores, o composto promoveu melhoria da qualidade do solo em menor prazo e isso se refletiu em maior crescimento e produção das plantas. O efeito benéfico do composto se deve a possuir maior CTC e ao fato de que sua mineralização aumenta o teor e disponibilidade de nutrientes como P e N de forma mais sustentável. Segundo Fischer e Glaser (2012), experimentos de longa duração mostram que o composto tem a capacidade de equalizar os efeitos de flutuações durante o ano em relação a água, aeração do solo, disponibilidade de nutrientes para as plantas e assim, beneficiar a produtividade das culturas. Isso possibilita uma maior segurança produtiva em relação a uso somente de adubo mineral. Entretanto, quando se usa somente composto, a produtividade das culturas é menor do que quando se usa apenas adubo mineral, pelo menos no primeiro ano. Isso pode ser explicado pela lenta liberação de nutrientes como o N durante a mineralização do composto.

Com relação aos resultados positivos de BSPA, obtidos no segundo experimento pelos tratamentos contendo biochar oxidado com HNO_3 , a diferença em relação ao primeiro experimento é que ele foi enriquecido com nitrogênio. Assim, ele forneceu nitrogênio para a cultura, principalmente nos tratamentos que tiveram alguma proporção de composto, o qual

também forneceu nitrogênio além de outros nutrientes, como o fósforo. Nesse aspecto, Mia *et al.* (2017) ressaltam que a aplicação de biochar oxidado traz benefícios para a produtividade agrícola e para mitigar a mudança climática. Segundo os autores essa oxidação ocorre naturalmente ao longo do tempo e esse “envelhecimento” do biochar promove a formação significativa de cargas superficiais negativas. Entretanto, esse processo pode ser acelerado pelo uso de agentes oxidantes químicos como H_2O_2 e HNO_3 . Isso proporciona uma maior capacidade de reter cátions e de aumentar a disponibilidade de ânions como o fosfato. O HNO_3 tem demonstrado ser um dos oxidantes mais fortes e tem como consequência a introdução de NO_2 , que causa aumento do teor de N do biochar, causando grande efeito positivo sobre a nutrição vegetal.

A observação da tendência de maiores valores de BSPA dos tratamentos com 0,75 e 0,50% de composto no experimento um, além do uso de somente composto, é corroborada pelo efeito positivo sobre o crescimento e produtividade de plantas, inclusive *Brachiaria brizantha*, quando fertilizantes orgânicos são aplicados junto com adubação mineral porque os fertilizantes orgânicos melhoram a capacidade de retenção de água e nutrientes pelo solo, além do aporte de nutrientes em relação à aplicação de apenas fertilizante mineral. Alguns estudos observaram vantagem dos adubos orgânicos sobre os minerais, sendo por isso uma alternativa para reduzir o uso de adubos minerais em pastagens. O melhor desempenho agrícola da aplicação de composto puro se deve a seus efeitos a curto prazo sobre a qualidade do solo e sobre o desempenho produtivo das plantas. Além do exposto, os aumentos em produtividade proporcionados pela aplicação de misturas de biochar com composto possibilitam usar menor quantidade de biochar (AGEGNEHU *et al.*, 2015, 2016; RIBEIRO JÚNIOR *et al.*, 2015; ORRICO JÚNIOR *et al.*, 2018; SCHULZ; GLASER, 2012; SCHMIDT *et al.*, 2015).

A tendência de maiores valores de BSPA dos tratamentos contendo 0,75 e 0,50% de composto no experimento dois foi observada apenas nos tratamentos que receberam biochar fresco. Neste sentido, Akmal *et al.* (2019) testaram algumas misturas de biochar com composto e observaram que a mistura de 15 g kg^{-1} de biochar com 5 g kg^{-1} de composto proporcionou o maior crescimento das plantas, atribuído a maior retenção de nutrientes pelo solo e aumento na eficiência de uso dos nutrientes. Os autores também observaram que a atividade microbiana no solo foi mais favorecida pela aplicação combinada de $10 + 10\text{ g kg}^{-1}$ de biochar e composto, enquanto a sorção do N mineral pelo biochar promoveu efeito negativo sobre a atividade microbiana no tratamento que recebeu 20 g kg^{-1} de biochar.

Quando se considera a aplicação somente de composto, deve-se ressaltar que é um adubo orgânico rico em N, que exerce efeitos positivos sobre a produção de pastagens e que é

uma fonte de N de menor custo (RIBEIRO JÚNIOR *et al.*, 2015). Entretanto, apesar dos possíveis benefícios agrícolas tanto a aplicação de composto ou de biochar individualmente, a mistura de biochar com composto pode ser mais eficiente e promissora em termos agrícolas devido ao efeito sinérgico dos dois materiais, além do sequestro de carbono, reciclagem de nutrientes e menor acumulação de resíduos em aterros (OLDFIELD *et al.*, 2018). Neste aspecto, Schulz e Glaser (2012) consideraram enorme a resposta do tratamento contendo apenas metade do biochar e metade do composto em relação aos tratamentos contendo somente biochar ou somente composto. Em uma mistura como essa, a importância do composto está em ser mineralizado mais rapidamente do que o biochar (FISCHER; GLASER, 2012). A combinação de biochar com materiais contendo matéria orgânica não pirogênica, entre os quais estrume e composto, é sugerida por diversas pesquisas, como maneira de aumentar a fertilidade do solo, mesmo quando são aplicadas doses de biochar entre 0,5 e 2 t ha⁻¹. Essa seria uma estratégia para desenvolver fertilizantes contendo carbono, que seriam efetivos em pequenas doses de aplicação (HAGEMANN *et al.*, 2017).

No experimento dois, que não recebeu adubação química, o tratamento que recebeu somente composto (T2) apresentou maior BSPA do que o tratamento que recebeu apenas biochar fresco. Isso porque a mineralização do composto fornece mais nutrientes que o biochar fresco. Entretanto, o T2 apresentou menor BSPA do que o tratamento que recebeu apenas biochar oxidado que forneceu nitrogênio, sem haver diferença significativa entre eles. Ou seja, o tratamento com apenas biochar oxidado foi significativamente maior do que o tratamento com apenas biochar fresco por causa do nitrogênio contido no HNO₃.

Os resultados gerais do estudo de Sánchez-Monedero *et al.* (2019) sugerem que a aplicação de uma mistura de biochar e composto pode beneficiar as culturas, pois pode auxiliar e manter a fertilidade do solo. Segundo os autores, a mistura de composto e biochar pode aumentar a recuperação de nutrientes de restos orgânicos e aumentar a retenção de água pelo solo, a eficiência de uso de nutrientes, o armazenamento de carbono e a atividade microbiana do solo. Entretanto, os benefícios da aplicação do biochar demoram a ser totalmente expressos (envelhecimento do biochar) e por isso o curto prazo dos experimentos não permite ao biochar expressar seu máximo potencial. Por outro lado, o composto e suas misturas com biochar demonstraram ser efetivos como fonte de nutrientes e tem potencial para promover e melhorar a atividade biológica do solo. Considerando todos os efeitos positivos observados os autores consideram a aplicação de misturas de composto com biochar como opção para aumentar a sustentabilidade de sistemas agrícolas.

Em seu estudo, Agegnehu *et al.* (2016) testaram misturas de composto e biochar com

adubo mineral e, em relação ao uso somente de adubo mineral, a massa seca das plantas de milho aumentou significativamente quando se acrescentou composto ou biochar. Além disso, sem adubo mineral, o uso de composto, de biochar e de suas misturas aumentaram a produtividade do milho. Os aumentos observados em biomassa do milho foram de 9 a 18% em relação ao adubo mineral. Em geral, a melhor retenção de água, status nutricional e absorção de nutrientes pelas plantas devido à adição de composto e de biochar promoveram aumento no crescimento e produtividade. Tendo em vista que os fertilizantes com biochar e composto adicionam tanto macro como micronutrientes eles podem proporcionar uma fertilização equilibrada.

Em estudo de Agegnehu *et al.* (2015) a aplicação de biochar, composto e suas misturas atenderam as principais deficiências de nutrientes do solo no local do seu experimento. Os autores observaram que a aplicação ao solo de biochar com ou sem composto, em várias combinações, junto com fertilizante mineral suplementar pode melhorar a qualidade do solo e incrementar a produtividade das plantas com benefícios adicionais de mitigar o aquecimento global. Este esquema pode, portanto, contribuir positivamente para a sustentabilidade agrícola e ambiental.

Em três locais de estudo, Oldfield *et al.* (2018) observaram que misturas de biochar e composto reciclam uma quantidade considerável de nutrientes e C resultando em maiores produtividades de plantas do que o fertilizante mineral e tem menor impacto ambiental.

Radin *et al.* (2018) obtiveram aumento quadrático na biomassa de mudas com o aumento da proporção de biochar ao substrato sem composto quando usaram 75 e 100% da dose de fertilizante químico recomendada. A biomassa de mudas dos tratamentos que receberam composto e 100% de fertilizante mineral seguiu uma relação quadrática positiva com o aumento da dose de biochar. A maior massa seca foi observada no tratamento contendo composto, biochar e 100% da dose de fertilizante químico. O tratamento que proporcionou a maior biomassa continha 1,5% de biochar, base peso, mais 30% de composto base volume, além de 75% da dose recomendada de fertilizante mineral. Segundo os autores, a mistura de composto e biochar possibilita reduzir o uso de fertilizantes minerais e é uma opção mais sustentável de produção.

As maiores produtividades de cevada foram obtidas por Agegnehu *et al.* (2016) usando biochar, composto e biochar mais composto, quando acompanhados de doses de N entre 23 e 46 kg/ha. Isso demonstra que, para se obter uma mesma produtividade, menos fertilizante nitrogenado mineral é necessário quando usado junto com fertilizantes orgânicos.

Em estudo de Glaser *et al.* (2015), a adição de 1,0 t/ha de biochar ao fertilizante mineral

aumentou produtividade de milho em 20%, comparado a somente mineral. Já a adição de 10 t/ha de biochar ao composto aumentou produtividade do milho em 26% em relação a somente composto. Ou seja, as combinações de biochar com fertilizante mineral e com composto apresentaram melhor desempenho do que a aplicação de somente fertilizante mineral ou somente composto em termos de produtividade e nutrição das plantas. Entre as conclusões do estudo estão que o biochar exerce efeito positivo sobre a produtividade do milho quando combinado com fertilizante mineral e que pequenas quantidades de biochar podem melhorar a eficiência do fertilizante mineral. Além disso, ficou demonstrado o potencial do biochar em melhorar o desempenho agrônômico principalmente quando combinado com fertilizantes orgânicos.

Em seu estudo, Steiner *et al.* (2007) aplicaram quantidades iguais de carbono sob forma de composto ou de biochar em arroz e sorgo. Os autores observaram que uma única aplicação de composto produziu quatro vezes mais grãos do que a aplicação de somente adubo mineral, enquanto a aplicação de biochar dobrou a produtividade quando em conjunto com adubo mineral, em comparação à aplicação de somente adubo mineral, sendo que a maior produção de biomassa da parte aérea das plantas foi obtida pela combinação de composto e adubo mineral. Essa biomassa aumentou 29% em parcelas que receberam biochar junto com adubo mineral, em relação a somente adubo mineral. Também foi observado que a aplicação somente de biochar não influenciou a produção das culturas, mas foi observado um efeito sinérgico quando biochar foi aplicado junto com o adubo mineral, causando um aumento da biomassa de 2,7 vezes.

Estudos citados por Agegnehu *et al.* (2017) demonstram que aplicação simultânea de biochar e composto resulta em melhorias na fertilidade do solo, capacidade retenção de água e sequestro de carbono. Segundo Akmal *et al.* (2019): aplicação de biochar com composto é uma estratégia útil para aumentar a fertilidade do solo e o crescimento de plantas. Segundo os autores, a combinação de biochar com composto na proporção de 15+5 g/kg de solo foi a que mais beneficiou os parâmetros de crescimento do tomateiro.

Em seu estudo, Trupiano *et al.* (2017) estudaram o efeito sobre a alface da aplicação de biochar, composto e suas combinações. O experimento de curto prazo mostrou claramente que a adição de composto proporcionou os melhores resultados em termos de qualidade e fertilidade do solo os quais se refletiram em melhor crescimento das plantas e produção de biomassa. Por sua vez, a aplicação somente de biochar também estimulou o crescimento das plantas e a biomassa. Entretanto, não foi observado efeito sinérgico ou aditivo da combinação de biochar e composto em relação aos dois individualmente. Apesar disso, a combinação de composto e biochar pode melhorar e manter características químicas e biofísicas do solo ao

longo do tempo, pois a maior parte do composto irá desaparecer em cinco anos após a aplicação enquanto a maior parte do biochar irá permanecer no solo por décadas e possivelmente beneficiar a produtividade da cultura em longo prazo.

4.2 Características do Solo

4.2.1 pH

O pH do solo apresentou efeito significativo dos tratamentos nos dois experimentos (Tabela 4). O pH do solo foi 15% maior no experimento 2, que não recebeu adubação química, do que no experimento 1, que recebeu adubação química, mas cujo coeficiente de variação foi bem maior do que o observado no experimento dois.

A acidificação do solo é uma das principais limitações para a produtividade agrícola, podendo causar diminuição na capacidade de troca de cátions, limitação nos processos biológicos do solo, menor disponibilidade de nutrientes, mobilização de elementos potencialmente tóxicos e diminuição no desenvolvimento e produtividade das culturas. Segundo Hale *et al.* (2020), 50% dos solos agrícolas do mundo são ácidos e isso causa redução entre 30 e 40% na produção agrícola. Nesse contexto, a maior acidez do solo no experimento um, que recebeu adubação química, pode ser explicada por Tkaczyk *et al.* (2020), que observaram que altas doses de adubação nitrogenada aceleraram o processo de acidificação do solo com pastagem, que foi ainda mais intensificado pela aplicação de adubos minerais contendo fósforo e potássio.

Tabela 4. Resumo da análise de variância de pH em água do solo cultivado com capim Marandu sob efeito de misturas de biochar e composto nos dois experimentos realizados

Fonte de variação	Graus de liberdade		Soma de quadrados		Quadrado médio		Valor de F		Prob >F	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Experimentos	1	2	4,60	10,97	0,51	1,22	5,83	120,19	0,0001**	0,0000**
Tratamentos	9	9	3,84	0,40	0,09	0,01	-	-	-	-
Erro	40	39	8,44	11,36	-	-	-	-	-	-
Total	49	48	-	-	-	-	-	-	-	-
¹ CV (%)	5,76	1,63	-	-	-	-	-	-	-	-
Média	5,38	6,19	-	-	-	-	-	-	-	-

¹Coeficiente de variação. **significativo (p<0,01).

Os resultados do experimento um mostram que o pH da testemunha (T1) foi o menor entre todos os tratamentos, em termos absolutos (Figura 2A). Esse pH foi aumentado significativamente pelos tratamentos T4 (0,5% composto + 0,5% biochar fresco), T5 (0,25% composto + 0,75% biochar fresco) e T6 (1% biochar fresco).

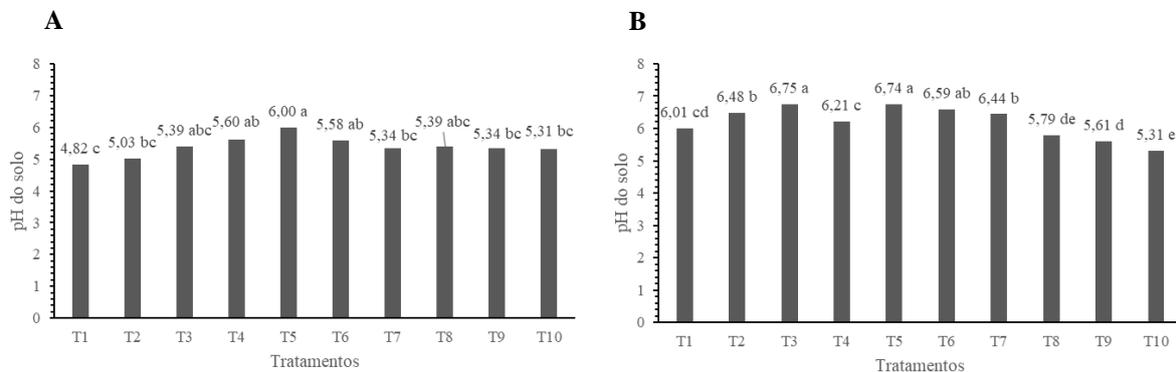


Figura 2. Médias do pH do solo cultivado com capim Marandu sob efeito de misturas de biochar e composto no experimento 1 (A), que recebeu adubação química, e no experimento 2 (B), sem adubação. T1: Testemunha sem aplicação de composto e biochar; T2: 10 g de composto kg^{-1} de solo; T3: 7,5 g de composto kg^{-1} de solo + 2,5 g de biochar fresco kg^{-1} de solo; T4: 5,0 g de composto kg^{-1} de solo + 5,0 g de biochar fresco kg^{-1} de solo; T5: 2,5 g de composto kg^{-1} de solo + 7,5 g de biochar fresco kg^{-1} de solo; T6: 10 g de biochar fresco kg^{-1} de solo; T7: 7,5 g de composto kg^{-1} de solo + 2,5 g de biochar oxidado kg^{-1} de solo; T8: 5,0 g de composto kg^{-1} de solo + 5,0 g de biochar oxidado kg^{-1} de solo; T9: 2,5 g de composto kg^{-1} de solo + 7,5 g de biochar oxidado kg^{-1} de solo; T10: 10 g de biochar oxidado kg^{-1} de solo.

Os aumentos na biomassa da parte aérea em colheitas sucessivas da *Brachiaria*, obtidos com a aplicação de biochar em relação à testemunha foram atribuídos por Latawiec *et al.* (2019) principalmente à correção da acidez do solo, que limita muito a produtividade das pastagens. Neste sentido, Jeffery *et al.* (2017) afirmam que grande parte do benefício da aplicação do biochar para a produtividade das culturas se deve ao seu efeito corretivo da acidez do solo, além de promover efeitos indiretos sobre a química dos solos (SOHI *et al.*, 2010). Segundo Nóbrega, 2011, muitos estudos indicam que a incorporação de biochar é uma maneira de alcalinizar o solo. Isso é causado, em curto prazo, pelas cinzas ou fase inorgânica do biochar, segundo Hale *et al.* (2020), enquanto em longo prazo o poder alcalinizante de grande parte dos biochars é atribuído à presença em sua superfície de grupamentos funcionais oxigenados, com cargas negativas (SIZMUR *et al.*, 2015). Outro aspecto, é o aumento da capacidade de tamponamento do pH do solo devido à aplicação de biochar (MADARI *et al.*, 2006). Essa atuação do biochar retendo e liberando os íons H^+ e OH^- para controlar o pH do solo (RESENDE *et al.*, 2011) ficou bem evidenciada, no presente estudo, pelos resultados obtidos pela aplicação de biochar fresco.

O pH alcalino do biochar, que causa diminuição da acidez do solo, também aumenta a capacidade de troca de íons do solo, podendo melhorar a eficiência de uso de nutrientes

(NOVOTNY *et al.*, 2015). Esse efeito de correção da acidez do solo, causa aumento do pH do solo e diminuição na concentração e toxicidade do Al^{3+} . Além disso, evita a deficiência de fósforo causada pela fixação dele por óxidos de ferro e de alumínio em solos com baixo pH (Hale *et al.*, 2020). Esses efeitos favorecem o ambiente radicular, melhorando a absorção pela planta de nutrientes como o nitrogênio (VAN ZWIETEN *et al.*, 2010).

Em estudos com vários solos de regiões tropicais o aumento em produtividade das culturas atribuído à aplicação de biochar foi maior quanto menor era o pH do solo antes da aplicação (JEFFERY *et al.*, 2017). Enquanto isso, Streubel *et al.* (2011) citam que foi observado aumento do pH do solo com a aplicação de diversos tipos de biochar em diferentes tipos de solo, com maior aumento em solos arenosos como o solo do presente estudo. Em média de diversos estudos revisados por Verheijen *et al.* (2010) o pH do solo aumentou de 5,3 para 6,2, devido ao biochar, havendo um caso de aumento de 4,8 para 7,8. Em estudo de Pimenta *et al.* (2019), após a incubação do solo com biochar, foi observado aumento do pH de 5,32 para 5,69 (7%) quando a dose de biochar aumentou de 0 para 10.500 kg ha⁻¹. Segundo Agegnehu *et al.* (2016), o efeito benéfico da aplicação de biochar é importante em solos que, em estado natural, apresentam baixo pH e baixa disponibilidade dos principais nutrientes para as plantas, ou seja, similares ao solo do presente estudo.

No experimento dois (Figura 2B), o pH do solo da testemunha foi ultrapassado significativamente pelos tratamentos T2 (1,0% composto), T3 (0,75% composto + 0,25% biochar fresco), T5 (0,25% composto + 0,75% biochar fresco), T6 (1% biochar fresco) e T7 (0,75% composto + 0,25% biochar oxidado), e foi diminuído significativamente pelo tratamento T10 (1% biochar oxidado com HNO₃), que apresentou o menor pH entre todos os tratamentos.

Em relação ao efeito do composto, Valarini *et al.* (2009) encontrou referências ao aumento do pH do solo devido à aplicação doses de 20 a 30 Mg ha⁻¹. Isso é atribuído ao aumento em bases trocáveis e consequente diminuição nos teores de Fe e de Al devido à complexação pelos ácidos húmicos, além da contribuição para a capacidade de tamponamento do solo. Em estudo de Liu *et al.* (2012) a aplicação de composto elevou o pH do solo em 0,6 unidades. Segundo Wong *et al.* (1998) o aumento no pH do solo resultante da aplicação de composto é diretamente proporcional à capacidade de consumo de prótons pelo material orgânico. Segundo os autores, o pH final do solo tratado pode ser previsto pela determinação em separado das características de tamponamento do solo e da matéria orgânica. Isso indica que um mecanismo importante de correção do solo pode ser a troca de prótons entre os sistemas de tamponamento do solo e da matéria orgânica. Além disso, o aumento do pH é diretamente

proporcional aos teores de bases Ca, Mg e K do material orgânico adicionado. Os autores presumem que essa relação foi obtida devido a que essas bases indicam a quantidade de grupos funcionais de ácidos orgânicos fracos.

Quanto ao menor pH de tratamentos que receberam biochar oxidado com HNO₃, estudo de Dashuan e Niu (2015) menciona a influência da oxidação com HNO₃ quando relaciona a aplicação de fertilizantes nitrogenados a uma redução global média do pH do solo em 0,26 unidades, diminuição que foi mais expressiva em solos de pastagens. Segundo os autores, o conteúdo de NO₃ do fertilizante é um fator que agrava a diminuição do pH. Os autores citam indicações de que a lixiviação do NO₃⁻ desempenha um papel importante na acidificação do solo, o que também pode estar relacionado à diminuição dos cátions Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ nos solos. Esta discussão é corroborada por estudo de Chan *et al.* (2007), os autores observaram que a aplicação de biochar proporcionou aumento do pH do solo em 1,22 unidades na ausência de fertilizante nitrogenado e de apenas 0,61 unidades quando foi aplicado fertilizante nitrogenado.

No experimento um, o tratamento recebendo apenas composto (T2) apresentou pH significativamente menor do que o tratamento que recebeu apenas biochar fresco (T6), mas não diferiu do tratamento que recebeu apenas biochar oxidado (T10). Segundo Zinati *et al.* (2001), com poucas exceções, a aplicação de composto causa diminuição do pH do solo. Neste sentido, Fischer e Glaser (2012) afirmam que a aplicação regular de composto mantém ou aumenta o pH do solo, pois possui um efeito corretivo da acidez do solo atribuído a ser rico em cátions alcalinos como Ca, Mg e K, que são liberados pela matéria orgânica durante sua mineralização. Os tratamentos que receberam apenas biochar, oxidado ou não, não diferiram estatisticamente entre si. No experimento um, não ficou clara uma tendência de superioridade entre os tipos de biochar, fresco ou oxidado. Entretanto, no experimento dois os tratamentos contendo biochar fresco apresentaram pH do solo (6,57) em média 13,5% maior do que os tratamentos contendo biochar oxidado com HNO₃ (5,79). Esses resultados confirmam o que foi discutido anteriormente sobre o poder corretivo da acidez do solo pelo biochar, enquanto confirmam a acidificação do solo pelo biochar oxidado com HNO₃.

O maior pH do solo no experimento um, em termos absolutos, foi proporcionado pelo tratamento T5 (0,25% composto + 0,75% biochar fresco), que não diferiu dos tratamentos T3 (0,75% composto + 0,25% biochar fresco), T4 (0,5% composto + 0,5% biochar fresco), T6 (1,0% biochar fresco) e T8 (0,5% composto + 0,5% biochar fresco). No experimento dois, os maiores pH foram proporcionados pelo T3 (0,75% composto + 0,25% biochar fresco) e T5 (0,25% composto + 0,75% biochar fresco), seguidos pelo T6 (1,0% biochar fresco).

Em relação às misturas de biochar com composto, foi observada tendência de maior pH

do solo nas misturas com 0,5; 0,75 e 1,0% de biochar fresco no experimento um, corroborando seu efeito corretivo da acidez do solo. Entretanto, não foi observada tendência de superioridade de nenhuma mistura quando se usou biochar oxidado com H_2O_2 . No experimento dois, quando se usou biochar fresco, a tendência de maior pH do solo foi para os tratamentos com 0,75% de composto (T3) e 0,75 de biochar (T5). Entretanto, quando se usou biochar oxidado com HNO_3 , a tendência de maior pH foi para a proporção de apenas 0,25% de biochar (T7). Os tratamentos que receberam a mesma proporção (0,5%) de composto e de biochar, oxidado ou não, não apresentaram diferença significativa entre eles no experimento um. Entretanto, no experimento dois o tratamento T4, que recebeu 0,5% de biochar fresco, apresentou pH maior do que o tratamento T8, que recebeu a mesma proporção de biochar oxidado com HNO_3 . Neste sentido, Huff e Lee (2016) observaram que o tratamento do biochar com H_2O_2 causa aumento na CTC do solo devido à adição de grupos funcionais oxigenados ácidos na superfície do biochar e isso causaria diminuição do pH do biochar.

Em estudo de Sánchez-Monedero *et al.* (2019) ficou demonstrado o aumento notável do pH do solo quando se aplicou a mistura de biochar com composto, comparado à testemunha. Neste estudo, foi aplicado biochar sozinho ou em combinação com composto em solos ácidos e foram obtidos aumentos médios em pH entre 0,15 e 0,50 unidades, sendo que o aumento foi de 0,46 unidades quando se aplicou apenas composto, 0,53 unidades quando se aplicou a mistura de biochar e composto e 0,15 unidades quando se aplicou apenas biochar. Por sua vez, Radin *et al.* (2018) aplicaram biochar, composto, e sua mistura em um meio de cultivo de mudas em sacos plásticos, tendo aumentado o pH do solo 0,59, 2,14, e 2,45 unidades, respectivamente, comparado ao solo sem nenhum dos materiais. Enquanto isso, Akmal *et al* (2019) observaram o maior pH do solo (8,33) quando aplicaram 20 g de biochar por kg de solo e o menor pH quando aplicaram 5 g de biochar mais 15 g de composto por kg de solo.

4.2.2 Matéria Orgânica

A matéria orgânica do solo (MOS) apresentou efeito significativo dos tratamentos nos dois experimentos (Tabela 5), sendo que, em média, o teor de MOS no experimento um, que recebeu adubação química foi 20% maior do que no experimento dois, que não recebeu adubação química e cujo coeficiente de variação foi bem menor. Segundo Steiner *et al* (2007), em solos tropicais fortemente intemperizados, a MOS é muito importante para a produtividade porque, em geral, contém ao redor de 95% do total de nitrogênio e enxofre e entre 20 e 75% do

fósforo da camada superficial. Por isso, ao longo do tempo, o uso intensivo do solo causa depleção da MOS e não é sustentável sem adição de nutrientes.

Tabela 5. Resumo da análise de variância do teor de matéria orgânica do solo (g kg^{-1}) cultivado com capim Marandu sob efeito de misturas de biochar e composto nos dois experimentos realizados

Fonte de variação	Graus de liberdade		Soma de quadrados		Quadrado médio		Valor de F		Prob >F	
	1 ¹	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Experimentos	1 ¹	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Tratamentos	9	9	7,71	156,11	0,86	17,35	3,31	4,68	0,004**	0,0003**
Erro	40	39	10,34	144,68	0,26	3,71	-	-	-	-
Total	49	48	18,06	662,49	-	-	-	-	-	-
² CV (%)	19,93	39,57	-	-	-	-	-	-	-	-
Média	2,55	4,87	-	-	-	-	-	-	-	-

¹Dados transformados pela raiz quadrada de $X+1$. ² coeficiente de variação. **significativo ($p < 0,01$).

A MOS, em teores adequados, favorece a aeração do solo e aumenta a retenção de água e nutrientes, além de proporcionar substrato para a biomassa microbiana do solo, beneficiando ainda mais a disponibilidade de nutrientes para as plantas. Segundo Fischer e Glaser (2012), a sustentabilidade da produtividade agrícola em longo prazo depende da manutenção da MOS pela adição contínua de resíduos e condicionadores orgânicos, entre os quais o composto maduro que, devido ao maior nível de carbono estável, pode ter 50% convertido em MOS. A compostagem é uma técnica de tratamento amplamente utilizada para que resíduos de origem animal possam ser usados como fertilizante, pois proporciona rápida estabilização da matéria orgânica (Orrico Júnior *et al.*, 2018). Segundo Agegnehu *et al.* (2015), a aplicação de composto aumenta a quantidade e a qualidade da MOS, melhorando assim a qualidade do solo. A maioria dos estudos revisados por Amlinger *et al.* (2007) demonstram claramente a melhor conversão de materiais orgânicos em humus por meio da compostagem. Entretanto, o enriquecimento do solo com MOS depende do tipo de composto, quantidade aplicada e grau de humidificação, além de características do solo (FISCHER; GLASER, 2012). Além disso, por não ser estável em médio a longo prazo, são necessárias reaplicações regulares de composto, ao longo do tempo, para obter aumentos significativos da MOS (Bass *et al.*, 2016).

Quanto ao efeito da aplicação de biochar sobre a MOS, Novotny *et al.* (2015) afirmam que este nome se aplica ao material orgânico carbonizado se ele for aplicado ao solo para aumentar sua fertilidade ou sequestrar CO_2 da atmosfera. Neste sentido, em solos de algumas regiões a aplicação de biochar é capaz de construir sistemas agrícolas mais resilientes e férteis por meio do aumento e manutenção do carbono orgânico do solo. Entretanto, somente à medida que o biochar se transforma em substâncias orgânicas, depois da aplicação, é que se pode quantificar o aumento do carbono orgânico pelo método mais comum de análise de matéria

orgânica do solo, que é a determinação do carbono orgânico via úmida pela oxidação com o dicromato de potássio. Essa metodologia quantifica o carbono contido em materiais orgânicos facilmente oxidáveis ou decomponíveis e não identifica compostos carbonáticos ou recalcitrantes como o carvão (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Os resultados do experimento um mostram que a MOS da testemunha (T1) foi maior em termos absolutos (Figura 3A – dados não transformados) apenas do que o tratamento T5 (0,25% composto + 0,75% biochar fresco). Esse resultado pode indicar problema metodológico. Todos os outros tratamentos apresentaram maiores valores absolutos de MOS, em relação à testemunha, com aumentos entre 20 e 163%, mas somente o T10 (1,0% de biochar oxidado com H₂O₂) foi significativamente maior. Isso está de acordo com Latawiec *et al.* (2019), que citam evidências de que o biochar retarda a mineralização da MOS e estimula a atividade microbiana.

A comparação do teor de MOS entre tratamentos do experimento que receberam apenas composto (T2), ou apenas biochar, oxidado (T10) ou não (T6), não mostra diferença significativa entre T2 e T6 (1,0% biochar fresco), apesar do T2 apresentar 38% menos MOS, mas que ambos apresentaram MOS muito menor do que o T10 (1,0% biochar oxidado). Neste experimento ficou clara a tendência de mais MOS nos tratamentos que receberam o biochar oxidado com H₂O₂ (7,5 g kg⁻¹), destacando-se o T10 e o T9 (0,75% biochar oxidado), em relação aos tratamentos que receberam biochar fresco (5,0 g kg⁻¹), apesar do teor relativamente alto de MOS do T6 (1,0% biochar fresco).

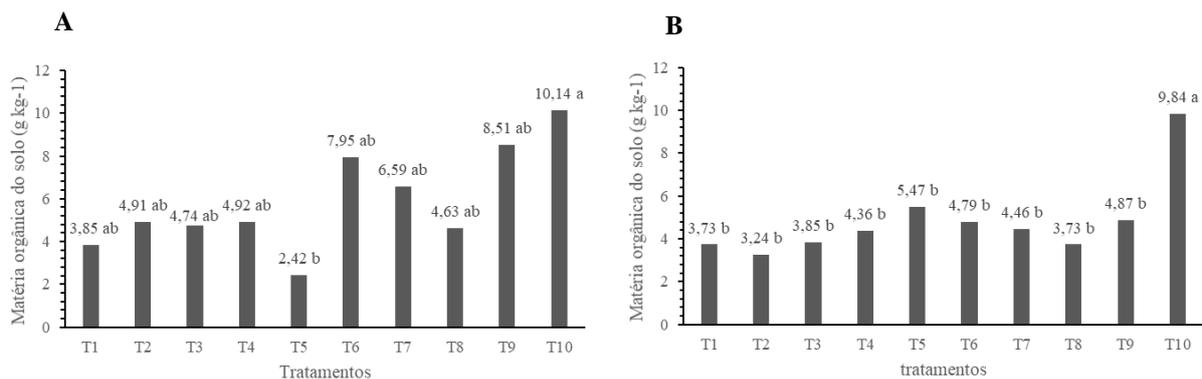


Figura 3. Médias do teor de matéria orgânica do solo cultivado com capim Marandu sob efeito de misturas de biochar e composto no experimento 1 (A), que recebeu adubação química, e no experimento 2 (B), sem adubação. T1: Testemunha sem aplicação de composto e biochar; T2: 10 g de composto kg⁻¹ de solo; T3: 7,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 2,5 g de biochar fresco kg⁻¹ de solo; T4: 5,0 g de composto kg⁻¹ de solo + 5,0 g de biochar fresco kg⁻¹ de solo; T5: 2,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 7,5 g de biochar fresco kg⁻¹ de solo; T6: 10 g de biochar fresco kg⁻¹ de solo; T7: 7,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 2,5 g de biochar oxidado kg⁻¹ de solo; T8: 5,0 g de composto kg⁻¹ de solo + 5,0 g de biochar oxidado kg⁻¹ de solo; T9: 2,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 7,5 g de biochar oxidado kg⁻¹ de solo; T10: 10 g de biochar oxidado kg⁻¹ de solo.

Os teores de carbono estável do biochar (70 a 90%) e do composto (2 a 14%) indicam o potencial significativo da aplicação destes materiais ao solo em sequestrar carbono, o qual é retirado do ciclo de carbono. A aplicação do biochar, devido à alta estabilidade em relação à decomposição, proporciona aumento duradouro da MOS e aproveitamento a longo prazo de todas as funções chave exercidas por ela no solo. Por sua vez, o composto contém matéria orgânica, carbono e macronutrientes disponíveis. Desta maneira, a aplicação de composto e misturas de biochar com composto são úteis devido ao suprimento direto de nutrientes e por impulsionar a ciclagem de nutrientes e estimular a atividade microbiana no solo. A mistura com biochar melhora o desempenho do composto por adicionar carbono mais estável, gerando um produto com as vantagens agronômicas do biochar, por reciclar quantidade significativa de carbono, e do composto, por reciclar quantidade significativa de nutrientes (OLDFIELD *et al.*, 2018; SÁNCHEZ-MONEDERO *et al.*, 2019).

Os resultados do experimento um podem ser corroborados por estudo de Radin *et al.* (2018) no meio de cultivo de mudas, que indica que a adição de biochar ao composto pode inibir as perdas de carbono, sendo que as maiores perdas de carbono ocorreram quando se aplicou somente composto e quando se aplicou as menores doses de biochar (0,5% base peso). Por outro lado, quando se aplicou as maiores doses de biochar (1,0 e 1,5% base peso), não foram observadas perdas de carbono até o final do estudo. Em estudo de Steiner *et al.* (2007) foram observadas menores perdas de MOS nos tratamentos que receberam biochar (4% quando não recebeu adubo mineral), em comparação com os tratamentos que receberam composto (27%) e à testemunha (perda de 25%).

No experimento dois (Figura 3B), que não recebeu adubação química e o biochar, quando oxidado, foi tratado com HNO_3 , os teores de MOS apresentaram pequenas diferenças não significativas entre todos os tratamentos, sem haver tendência de superioridade entre os tratamentos contendo biochar fresco ou oxidado. A exceção foi o T10, com 1,0% de biochar oxidado com HNO_3 , que apresentou 164% mais MOS do que a testemunha. Isso pode ser devido à grande quantidade de biochar aplicada, da qual alguma parte se transformou em formas orgânicas, e ao aumento da biomassa microbiana do solo, alimentada pelo carbono do biochar. A estabilidade do biochar no solo se deve à recalcitrância química de sua estrutura, formada por compostos aromáticos e heterocíclicos de carbono. A composição química da MOS é modificada pelo biochar devido à adsorção de carbono orgânico dissolvido e aumento no número de grupos aromáticos e carboxílicos das substâncias húmicas do solo. Isso aumenta

a resistência da MOS à degradação microbiana e mineralização, favorecendo a acumulação de MOS em longo prazo (JINDO *et al.*, 2012).

No experimento dois, os tratamentos contendo biochar oxidado receberam nitrogênio mineral residual do HNO_3 , que pode ter estimulado a decomposição da MOS, diferentemente do experimento um. Segundo Kotschi (2015) essa decomposição é mais rápida quanto maiores forem as quantidades de N aplicadas. Por outro lado, no experimento um, a explicação dos maiores teores de MOS dos tratamentos contendo biochar oxidado, pode ser a transformação do biochar em substâncias orgânicas pelo H_2O_2 . Neste aspecto, existem trabalhos demonstrando a oxidação/mineralização da matéria orgânica pelo H_2O_2 , que inclusive é utilizado em metodologias de análise de solos (Verdade, 1954). No caso do experimento dois, Hagemann *et al.* (2017) relatam que mesmo com a aplicação de pequenas quantidades de biochar, se existir uma fonte de nitrogênio, o biochar retém o nitrogênio, impedindo sua lixiviação, e posteriormente disponibiliza o nitrogênio por um tempo mais longo do que em solo no qual foi aplicado apenas composto ou fertilizante mineral. Entretanto, os autores afirmam que se o biochar for modificado com H_2O_2 , como no experimento um, ocorre aceleração da mineralização da SOM, com liberação rápida de seus nutrientes e perda de parte deles.

Em relação às misturas de biochar com composto, no experimento um foi observada tendência de maior MOS do solo nos tratamentos com 1,0% de biochar (T6 e T10) e com 0,75% de biochar oxidado (T9). No experimento dois, além da superioridade do T10, houve pequena tendência favorável aos tratamentos que usaram 0,75% de biochar fresco ou oxidado (T5 e T9). Quanto aos tratamentos que receberam a mesma proporção de biochar, oxidado (T4) ou não (T8), os teores de MOS deles não diferiram significativamente entre si no experimento um, nem no experimento dois.

Existem hipóteses sobre o efeito sinérgico da combinação de biochar com composto, que é atribuído à estabilidade do biochar, que promove o sequestro de carbono, além da melhoria de propriedades do solo proporcionada pela matéria orgânica do composto e pelo fornecimento de nutrientes para as plantas devida à mineralização do composto (RADIN *et al.*, 2018). Esse efeito sinérgico foi observado em vários estudos revisados por Sánchez-Monedero *et al.* (2019) e se manifestou sobre processos microbianos no solo, influenciando os ciclos de nutrientes, promovendo a estabilização do carbono por meio da formação de complexos organo-minerais e formando um revestimento nas superfícies internas e externas do biochar. Estes autores realizaram experimentos de campo em três locais e observaram aumento em carbono orgânico do solo de 13,6%, 11,1% e 10,4% quando aplicaram biochar, mistura biochar-composto ou composto, respectivamente em relação à testemunha. Esse

comportamento pode ser comparado ao obtido no segundo experimento do presente estudo, quando se usou o biochar oxidado com HNO_3 . Os mesmos autores relatam que, em geral, os aumentos maiores e mais duradouros no carbono orgânico do solo foram promovidos pelo biochar (122%) e pela mistura de composto e biochar (50%).

Como ficou mais evidenciado no experimento um do presente estudo, a mistura de biochar rico em carbono ao composto aumenta o teor de matéria orgânica da mistura. Isso é ilustrado por aumento no teor de carbono da mistura de composto maduro com 20 a 35% de biochar (VANDECASTEELE *et al.*, 2016). Esse aumento é esperado, considerando os altos teores de carbono do biochar, que são mais baixos no composto, de maneira que o aumento na proporção de biochar na mistura gera material com maior teor de carbono. Os autores afirmam que quanto maiores as diferenças nas características químicas e físicas entre o biochar e o composto, maior o efeito de sua mistura, sendo que esses efeitos são maiores quanto maior a proporção de biochar na mistura.

4.2.3 Teor de Fósforo

O teor de fósforo no solo apresentou efeito altamente significativo dos tratamentos nos dois experimentos (Tabela 6). No experimento dois, a análise da variância foi realizada com os dados transformados pela raiz quadrada de x . As médias do teor de fósforo do solo, com dados não transformados, foi menor no experimento um ($3,91 \text{ mg dm}^{-3}$) que recebeu adubação química e o biochar, quando oxidado, foi tratado com H_2O_2 , do que no experimento dois ($8,72 \text{ mg dm}^{-3}$), sem adubação química e biochar, quando oxidado, tratado com HNO_3 . Possivelmente, além da adubação química não ter fornecido fósforo, as plantas com maior crescimento no experimento um absorveram mais esse elemento, diferentemente do experimento dois, no qual as plantas tiveram menor crescimento. Além disso, nos tratamentos do experimento dois nos quais o biochar foi oxidado com HNO_3 , este pode ter promovido maior solubilização dos nutrientes contidos no composto e no biochar, como relatado por Sahin *et al.* (2017). Os nutrientes solubilizados, que não foram consumidos devido ao pequeno desenvolvimento das plantas, permaneceram na solução do solo. Em estudo de Steiner *et al.* (2007), a disponibilidade de nutrientes no solo permaneceu alta ao longo do tempo nos tratamentos que receberam biochar, apesar da remoção de nutrientes pela cultura.

Até recentemente, segundo Stentiford e Sánchez-Monedero (2016), maior ênfase era dada aos fertilizantes minerais, principalmente nitrogenados, para fornecer nutrientes para a produção agrícola. Atualmente existe preocupação quanto à disponibilidade limitada de

fertilizantes fosfatados minerais, cujas reservas irão diminuir depois de 2035 e se exaurir entre 50 e 100 anos da presente data (OLDFIELD *et al.*, 2018). Por isso, para estender o tempo de exploração das reservas de fósforo mineral é necessário aumentar a eficiência de uso do fósforo pelas plantas e adotar fontes alternativas de fósforo, como o composto que, além de seu conteúdo de nutrientes, melhora a estrutura do solo. Neste sentido, Agegnehu *et al.* (2016) destacam que a aplicação de fertilizante orgânico proporciona maior disponibilidade de fósforo para as plantas do que a aplicação de fertilizante mineral. Os autores relatam que o composto e o biochar, além de suprir fósforo para o solo, melhoram sua disponibilidade pela redução de sua sorção e lixiviação e por melhorar o contato entre as raízes e o fertilizante.

Tabela 6. Resumo da análise da análise de variância do teor de Fósforo (mg dm^{-3}) do solo cultivado com capim Marandu sob efeito de misturas de biochar e composto nos dois experimentos realizados

Fonte de variação	Graus de Liberdade		Soma de quadrados		Quadrado médio		Valor de F		Prob >F	
	1	2 ¹	1	2	1	2	1	2	1	2
Experimentos	1	2 ¹	1	2	1	2	1	2	1	2
Tratamentos	9	9	42,41	44,89	4,71	4,99	3,32	40,21	0,004**	0,0000**
Erro	40	39	56,74	4,84	1,42	0,12	-	-	-	-
Total	49	48	99,15	49,72	-	-	-	-	-	-
² CV (%)	30,45	12,69	-	-	-	-	-	-	-	-
Média	3,91	2,78	-	-	-	-	-	-	-	-

¹Dados transformados pela raiz quadrada de X. ²Coeficiente de variação. **significativo ($p < 0,01$).

Os resultados do experimento um mostram que o teor de fósforo do solo na testemunha (T1) diferiu estatisticamente apenas do tratamento T6 (1,0% biochar fresco) que apresentou o menor teor absoluto de fósforo (Figura 4A). Neste sentido, Morales *et al.* (2013) afirmam que biochars podem diferir muito em suas propriedades de sorção e dessorção de fósforo, que interage com cálcio, magnésio e, ou potássio do biochar. No caso de um biochar com alto teor de cálcio, uma diminuição na eficiência de uso do fósforo indica um aumento na sorção de fósforo pelo biochar atribuída a que o cálcio tenha induzido a sorção do fósforo ou sua precipitação. Isso é ilustrado por Carvalho *et al.* (2013) que não observaram efeitos de diferentes doses de biochar sobre os teores de fósforo no solo.

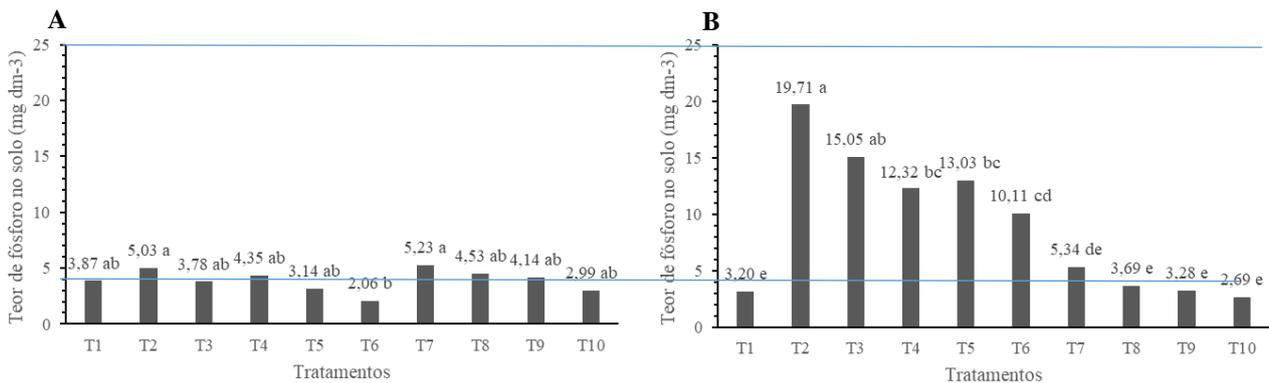


Figura 4. Médias do teor Fósforo do solo cultivado com capim Marandu sob efeito de misturas de biochar e composto no experimento 1 (A), que recebeu adubação química, e no experimento 2 (B), sem adubação (dados transformados pela raiz quadrada de X). T1: Testemunha sem aplicação de composto e biochar; T2: 10 g de composto kg⁻¹ de solo; T3: 7,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 2,5 g de biochar fresco kg⁻¹ de solo; T4: 5,0 g de composto kg⁻¹ de solo + 5,0 g de biochar fresco kg⁻¹ de solo; T5: 2,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 7,5 g de biochar fresco kg⁻¹ de solo; T6: 10 g de biochar fresco kg⁻¹ de solo; T7: 7,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 2,5 g de biochar oxidado kg⁻¹ de solo; T8: 5,0 g de composto kg⁻¹ de solo + 5,0 g de biochar oxidado kg⁻¹ de solo; T9: 2,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 7,5 g de biochar oxidado kg⁻¹ de solo; T10: 10 g de biochar oxidado kg⁻¹ de solo.

No experimento dois (Figura 4B – dados não transformados), a testemunha apresentou teor de fósforo do solo estatisticamente similar aos tratamentos T4 (0,5% composto + 0,5% biochar fresco), T7 (0,75% composto + 0,25% biochar oxidado), T9 (0,25% composto + 0,75% biochar oxidado) e T10 (1,0% biochar oxidado), que apresentou o menor teor de fósforo do solo, em termos absolutos. Além da possível sorção do fósforo pelo biochar, já discutida, existe a possibilidade de que o biochar oxidado com HNO₃, por ser ácido, tenha dissolvido o fósforo e tornado mais fácil a sua perda do solo. Isso é suportado por Sahin *et al.* (2017), para quem a modificação do biochar com HNO₃ pode aumentar a solubilidade em água de nutrientes para as plantas contidos no biochar, que podem ser lixiviados.

O tratamento T2 no experimento um, que recebeu apenas composto (1,0%) apresentou teor de fósforo do solo significativamente maior (144 e 68%) do que os tratamentos que receberam 1,0% de biochar fresco (T6) ou biochar oxidado (T10), os quais não diferiram significativamente entre eles. Essa tendência foi mais expressiva no experimento dois, no qual o T2 apresentou teor de fósforo no solo 95% maior que no T6 e 633% maior do que no T10. Sendo que o T6 apresentou teor de fósforo 276% maior do que o T10, que pode ser devido à oxidação com HNO₃, como já discutido. Estes resultados se alinham com a afirmação de Stentiford e Sánchez-Monedero (2016) de que a presença no composto de fosfato, necessário

para as culturas e cujas fontes estão diminuindo, se apresenta como oportunidade para que o composto atenda a essas necessidades.

Além disso, ao estabelecer a equivalência como fertilizante do adubo fosfatado mineral e do composto, com ou sem biochar, Vandecasteele *et al.* (2016) observaram influência clara do composto sobre os teores de fósforo prontamente disponível do solo, mas a adição de biochar não influenciou a capacidade de substituir o fertilizante mineral, inclusive houve diminuição no teor de fósforo prontamente disponível quando se adicionou biochar ao composto maduro. De maneira que essa adição afetou a disponibilidade de fósforo do composto, mudando seu valor como fertilizante.

No experimento um foi observada tendência de superioridade (27%) em teor de fósforo do solo da média dos tratamentos que receberam o biochar oxidado ($4,2 \text{ mg dm}^{-3}$) com H_2O_2 sobre os tratamentos que receberam biochar fresco ($3,3 \text{ mg dm}^{-3}$). Inclusive, o maior valor absoluto do teor de fósforo foi observado no tratamento T7 (0,75% composto + 0,25% biochar oxidado). Esses resultados evidenciam a aceleração da mineralização da matéria orgânica pelo H_2O_2 , como já discutido. Entretanto, no experimento dois a tendência de superioridade em termos de teor de fósforo no solo é mais evidente (77%) em favor da média dos tratamentos recebendo biochar fresco ($10,5 \text{ mg dm}^{-3}$), em relação aos tratamentos recebendo biochar oxidado ($5,9 \text{ mg dm}^{-3}$). Isso reforça, mais uma vez, a possibilidade do tratamento com HNO_3 ter promovido maior solubilização do fósforo do biochar e do composto, facilitando suas perdas.

Apesar dos resultados obtidos no presente estudo, diversos autores relatam o efeito positivo da aplicação de biochar sobre a nutrição das plantas com fósforo, indicando o biochar como fonte significativa de fósforo disponível para as culturas. A aplicação de biochar promoveu aumento de 29% no teor de fósforo do solo em estudo de Miranda *et al.* (2017), enquanto Petter *et al.* (2012) obtiveram aumento de 17% na disponibilidade de P em relação a testemunha quando aplicaram 32 Mg ha^{-1} de biochar. Além desses autores, aumentos também foram observados por Chan *et al.* (2007), em experimento em vasos, e Silva *et al.* (2011), no campo. Segundo Sohi *et al.* (2010), entre os efeitos em curto prazo da aplicação de biochar sobre as culturas, está o efeito indireto do biochar sobre a disponibilidade de P no solo e também o fornecimento direto de fósforo pelas cinzas do biochar.

O biochar melhora a disponibilidade de fósforo por ser fonte de sais solúveis contendo fósforo e de formas de P trocável; por aumentar o pH do solo, evitando a precipitação do fósforo; por sua ligação ou sorção de elementos que precipitam o fósforo e por promover a atividade microbiana, que influencia a disponibilidade de fósforo (ALBUQUERQUE *et al.*, 2012). A influência do pH sobre a disponibilidade de fósforo ocorre em solos ácidos, onde se

formam fosfatos de alumínio e de ferro, e em solos alcalinos, onde predominam fosfatos de cálcio, todos insolúveis. Mas, como o pH do biochar é de neutro a básico, sua adição ao solo aumenta o pH, anulando a influência do alumínio e do ferro em solos ácidos (NÓBREGA, 2011). Além disso, devido ao biochar ser uma forma de matéria orgânica, o fósforo ligado a ele torna-se disponível no solo, enquanto que o fósforo ligado a minerais de argila, inorgânicos, é indisponível (MADARI *et al.*, 2006).

Em relação às misturas de biochar com composto, no experimento um foi observada tendência de maior teor de fósforo do solo nos tratamentos contendo 0,50% e 0,75% de composto (T3, T4, T7 e T8). No experimento dois, houve tendência favorável aos tratamentos que usaram 0,75% e 0,25% de composto com biochar fresco e 0,50% de composto com biochar oxidado (T3, T5 e T8). O teor de fósforo dos tratamentos que receberam a mesma proporção de composto e de biochar (T4 e T8) não diferiram entre si no experimento um. Entretanto, no experimento dois, o teor observado de fósforo do solo foi 234% maior no T8 do que no T4.

O comportamento das misturas de composto e biochar foi estudado por Agegnehu *et al.* (2016), que observaram, ao longo do tempo, maior teor e disponibilidade de P no solo nos tratamentos que receberam composto e biochar do que no solo que recebeu fertilizante mineral. Isso indica que o composto e o biochar forneceram fósforo para o solo e também melhoraram sua disponibilidade pela redução em sua sorção e lixiviação. Os autores afirmam que a aplicação de biochar e composto a solos ácidos e pobres em nutrientes diminui a lixiviação, melhora o contato entre raízes e o fertilizante e, assim otimiza a disponibilidade de fósforo para as plantas. Além desses autores, Radin *et al.* (2018) relatam que a incorporação de biochar e composto ao solo pode aumentar a disponibilidade de fósforo e estimular significativamente a absorção de fósforo pelas plantas de azevém e milho, o que é atribuído ao efeito corretivo da acidez do solo pelo biochar que diminui a fixação do fósforo por óxidos de ferro e alumínio no solo. Por sua vez, estudo de Akmal *et al.* (2019) mostra melhoria em propriedades químicas do solo e minimização da fixação de fósforo quando aplicaram biochar e composto. Neste estudo, a testemunha, que não recebeu nenhum fertilizante, apresentou 5,86 mg kg⁻¹ de fósforo disponível e o tratamento que aplicou 10 g de biochar mais 10 g de composto por kg de solo apresentou 13,97 mg kg⁻¹ de fósforo disponível.

4.2.4 Teor de Potássio

O teor de potássio do solo não apresentou efeito significativo dos tratamentos no experimento um, porém apresentou efeito significativo no experimento dois (Tabela 7).

Tabela 7. Resumo da análise de variância do teor de Potássio (mg dm^{-3}) do solo cultivado com capim Marandu sob efeito de misturas de biochar e composto nos dois experimentos realizados

Fonte de variação	Graus de liberdade		Soma de quadrados		Quadrado médio		Valor de F		Prob >F	
	1	2 ¹	1	2	1	2	1	2	1	2
Experimentos	1	9	290,39	4,81	32,27	0,53	0,681	34,88	0,721 ^{ns}	0,0000**
Tratamentos	9	39	1894,77	0,60	47,37	0,02	-	-	-	-
Erro	40	48	2185,16	5,41	-	-	-	-	-	-
Total	49									
² CV (%)	29,96	8,57	-	-	-	-	-	-	-	-
Média	22,97	1,44	-	-	-	-	-	-	-	-

¹Dados transformados pelo logaritmo de X. ²Coefficiente de variação. **significativo ($p < 0,01$). ^{ns}não significativo

Os resultados de teor de potássio do solo do experimento um (Figura 5A), no qual todos os tratamentos, incluindo a testemunha, receberam adubação química com nitrogênio e potássio, indicam a não existência de efeito significativo dos tratamentos. O fornecimento extra de potássio via adubação, além do contido no biochar e no composto, possibilitou uma disponibilidade no solo suficiente para o desenvolvimento das plantas e para manter um nível de potássio similar entre os tratamentos. Nesse experimento, o menor valor absoluto do teor de potássio no solo foi observado no tratamento T2, que recebeu apenas composto, mas que apresentou a maior massa seca e, por isso, pode ter consumido mais potássio.

O menor valor absoluto de teor de potássio do solo no experimento dois (Figura 5B – dados não transformados) foi observada no tratamento T9 (0,25% composto + 0,75% biochar oxidado), que não diferiu estatisticamente dos tratamentos T10 (1,0% biochar oxidado), ou seja, os tratamentos que receberam as maiores percentagens de biochar oxidado com HNO_3 (0,75 e 1,00%). Provavelmente, oxidação do biochar com HNO_3 pode ter acelerado a mineralização do potássio contido no composto e no próprio biochar e esse potássio pode ter sido perdido do solo. No experimento dois, o maior valor absoluto de teor de potássio do solo foi obtido pelo tratamento T6, que recebeu 1% de biochar fresco, o qual não diferiu estatisticamente dos tratamentos T2, T3, T4 e T5, os quais foram superiores estatisticamente aos tratamentos que receberam biochar oxidado. Provavelmente, o potássio contido no biochar fresco e no composto foi liberado para o solo e como não foi totalmente aproveitado pelas plantas, que apresentaram pequeno desenvolvimento, ficou acumulado no solo. O teor relativamente alto de potássio no biochar é ressaltado por Radin *et al.* (2018), os quais observaram uma maior liberação potássio em meio de cultivo de mudas em sacos plásticos que receberam biochar, principalmente no início do desenvolvimento das mudas. Os autores coletaram a quantidade de potássio lixiviada, que apresentou correlação positivo com a quantidade de biochar aplicada e foi maior do que a testemunha.

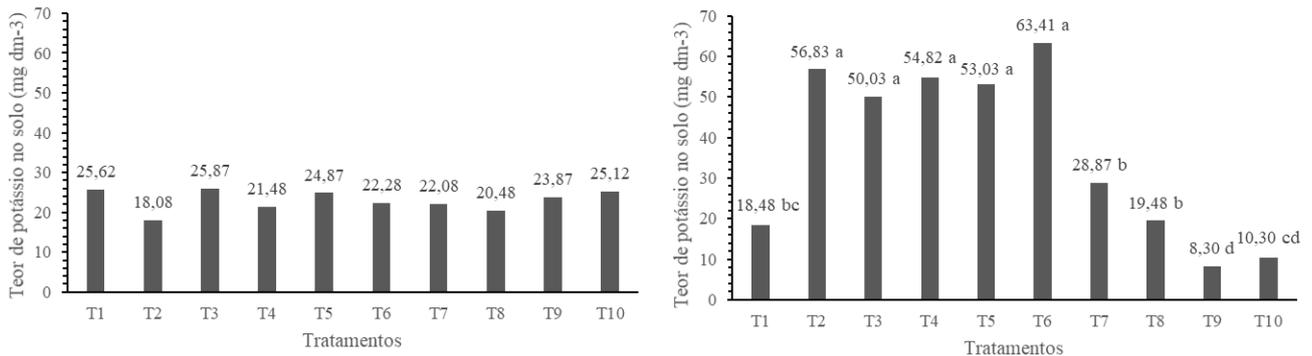


Figura 5. Médias do teor Potássio do solo cultivado com capim Marandu sob efeito de misturas de biochar e composto no experimento 1 (A), que recebeu adubação química, e no experimento 2 (B), sem adubação. T1: Testemunha sem aplicação de composto e biochar; T2: 10 g de composto kg⁻¹ de solo; T3: 7,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 2,5 g de biochar fresco kg⁻¹ de solo; T4: 5,0 g de composto kg⁻¹ de solo + 5,0 g de biochar fresco kg⁻¹ de solo; T5: 2,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 7,5 g de biochar fresco kg⁻¹ de solo; T6: 10 g de biochar fresco kg⁻¹ de solo; T7: 7,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 2,5 g de biochar oxidado kg⁻¹ de solo; T8: 5,0 g de composto kg⁻¹ de solo + 5,0 g de biochar oxidado kg⁻¹ de solo; T9: 2,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 7,5 g de biochar oxidado kg⁻¹ de solo; T10: 10 g de biochar oxidado kg⁻¹ de solo.

No experimento um, apesar de não se poder estabelecer uma diferença estatística, existe tendência de menor teor de potássio no solo do tratamento que recebeu apenas composto (T2) em relação aos tratamentos que receberam apenas biochar, fresco (T6) ou oxidado (T10). Neste aspecto, o tratamento T10 apresenta tendência de maior teor de potássio do que o T6. Segundo Jeffery *et al.* (2011), a maior disponibilidade de nutrientes no solo, principalmente potássio, é um dos principais efeitos positivos da aplicação de biochar sobre a produtividade das culturas.

Segundo Petter *et al.* (2012), o biochar contém quantidades consideráveis de K e outros nutrientes. O aumento da disponibilidade de potássio para as plantas após a aplicação de biochar ao solo foi observado por Latawiec *et al.* (2019) em experimentos com gramíneas forrageiras tanto em vasos como no campo e também por Madari *et al.* (2006), Chan *et al.* (2007), e Silva *et al.* (2011). Além deles, Pimenta *et al.* (2019) observou aumento não significativo no teor de potássio no solo, de 25,18 para 32,14 mg dm⁻³ (28%), entre a testemunha e a maior dose de biochar.

Neste contexto, os tratamentos que receberam biochar fresco, no experimento dois, apresentaram clara superioridade em termos de teor de potássio do solo em relação aos tratamentos que receberam biochar oxidado com HNO₃. Nesse experimento, os tratamentos que receberam biochar fresco apresentaram teor de potássio do solo, em média de 55,32 mg dm⁻¹, que foi 230% maior do que a média dos tratamentos que usaram biochar oxidado (16,74

mg dm⁻¹). Neste sentido, já foi discutida a afirmação de Sahin *et al.* (2017) sobre o aumento da solubilidade em água de nutrientes contidos no biochar modificado com HNO₃, facilitando as perdas de potássio.

Em relação às misturas de biochar com composto, no experimento dois foi verificado, entre os tratamentos recebendo biochar fresco, uma ligeira superioridade do tratamento T6, que recebeu 1,0% de biochar (a maior proporção), enquanto entre os tratamentos que receberam biochar oxidado a tendência de maior teor de potássio do solo foi do tratamento T7, que recebeu a menor proporção de biochar (0,25%). Quando se compara os tratamentos que receberam a mesma proporção de composto e de biochar (0,5%), verifica-se que no experimento um eles apresentaram teores de potássio semelhantes, enquanto no experimento dois o tratamento T4, que recebeu biochar fresco, apresentou teor de potássio no solo 181% maior do que o T8, que recebeu biochar oxidado com HNO₃, com as consequências já discutidas.

Em estudo de Akmal *et al.* (2019), a testemunha sem adubação apresentou teor de potássio extraível de 91 mg kg⁻¹, enquanto o maior teor (139 mg kg⁻¹) foi observado quando se aplicou 20 g de composto por kg de solo. O segundo maior teor (135 mg kg⁻¹) foi observado no solo que recebeu uma mistura de 5 g de biochar + 15 g de composto por kg de solo.

Em estudo de Glaser *et al.* (2015), o maior teor de potássio trocável no solo após a colheita do milho foi obtido quando se aplicou composto com, pelo menos 10 Mg ha⁻¹ de biochar. Por outro lado, o teor de potássio foi significativamente maior no solo tratado com composto, do que o tratamento que recebeu adubo mineral. Isso é devido a que, além do composto ter um alto teor de potássio, 100% desse potássio pode ser aproveitado como fertilizante. Além disso, a aplicação de composto evita mais a lixiviação de nutrientes do que a aplicação de fertilizante mineral. Os autores fornecem uma explicação sobre o tratamento com composto (T2) não ter se destacado muito no presente estudo, que é o fato de que os nutrientes do composto não serem imediatamente disponíveis para as plantas, pois existem várias formas e diferentes intensidades de ligação dentro da matriz orgânica, o que resulta em imobilização temporária dos nutrientes.

A aplicação de composto e de misturas de biochar com composto teve impacto positivo na ciclagem de nutrientes em estudo de Sánchez-Monedero *et al.* (2019), tendo promovido aumento no teor de potássio no solo, enquanto a aplicação somente de biochar não influenciou a disponibilidade de nutrientes. Segundo os autores, a aplicação de composto aumentou a disponibilidade de nutrientes necessários para a atividade de microrganismos do solo e de plantas. O valor fertilizante do composto se destacou por aumento significativos no teor de potássio extraível.

Apesar de citar estudos recentes nos quais o efeito da fertilização potássica por meio do biochar foi muito significativo para espécies leguminosas em termos de crescimento, fixação biológica de nitrogênio e capacidade de competição com outras espécies, Agegnehu *et al.* (2015) testaram o fornecimento de altas concentrações de potássio ao amendoim por meio de tratamentos contendo composto e esse misturado com biochar. Esses tratamentos favoreceram a produtividade e proporcionaram aumento significativo na disponibilidade de potássio no solo.

4.2.5 Teor de Cálcio

O teor de cálcio do solo apresentou efeito significativo dos tratamentos nos dois experimentos (Tabela 8). Este teor foi 49% maior no experimento dois, que não recebeu adubação química, do que no experimento um, que recebeu adubação química e cujo coeficiente de variação foi maior. Segundo Vandecasteele *et al.* (2016), tanto biochar como composto possuem altos teores de cálcio. A quantidade significativa de nutrientes importantes para as plantas contidas no composto, entre os quais o cálcio, é ressaltada por Fischer & Glaser (2012). Por outro lado, estudo de Van Zwieten *et al.* (2010) demonstra a capacidade de diferentes tipos de biochar adicionarem cálcio ao solo, na presença ou ausência de adubo mineral. As cinzas presentes junto com o biochar adicionam cálcio e magnésio para a solução do solo, aumentando desta forma o pH do solo e melhorando a disponibilidade de nutrientes para as plantas (AGEGNEHU *et al.*, 2015; LATAWIEC *et al.*, 2019).

Tabela 8. Resumo da análise de variância do teor de Cálcio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) do solo cultivado com capim Marandu sob efeito de misturas de biochar e composto nos dois experimentos realizados

Fonte de variação	Graus de Liberdade		Soma de quadrados		Quadrado médio		Valor de F		Prob >F	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Experimentos*	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Tratamentos	9	9	1,21	1,23	0,13	0,14	7,09	4,52	0,0000**	0,0004**
Erro	39	39	0,74	1,18	0,02	0,03	-	-	-	-
Total	48	48	1,94	2,42	-	-	-	-	-	-
¹ CV (%)	16,42	13,92	-	-	-	-	-	-	-	-
Média	0,84	1,25	-	-	-	-	-	-	-	-

¹Coeficiente de variação. **significativo ($p < 0,01$).

O teor de cálcio do solo referente à testemunha, que manteve teores semelhantes aos originais do solo, não diferiu estatisticamente de nenhum dos outros tratamentos no experimento um (Figura 6A), com exceção do tratamento T10 (1,0% biochar oxidado com H_2O_2), que apresentou o maior teor de cálcio do solo em termos absolutos. O fato do T10 ter a maior quantidade de biochar, e ainda por ter havido oxidação com H_2O_2 , pode ter causado a

maior liberação de cálcio para o solo, um pouco maior do que no tratamento T9, que também continha quantidade alta de biochar oxidado. Por sua vez, o menor teor de cálcio do solo em termos absolutos foi observado no tratamento T8 (0,5% composto + 0,5% biochar oxidado). Neste tratamento que, em relação a T9 e T10, tinha menor quantidade de biochar para liberar cálcio, possivelmente o cálcio liberado pelo composto tenha sido retido pelos sítios de troca do biochar oxidação, os quais eram em maior número em relação ao T4.

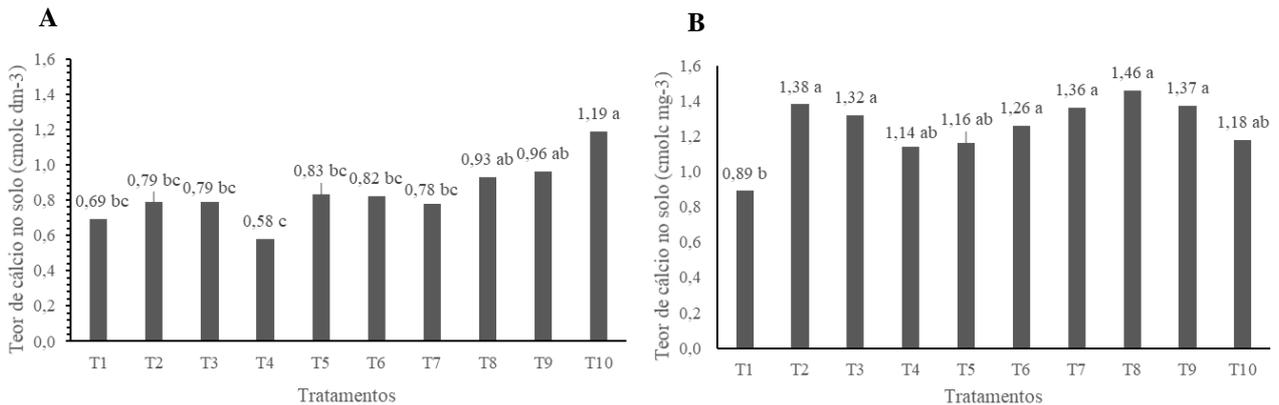


Figura 6. Médias do teor Cálcio do solo cultivado com capim Marandu sob efeito de misturas de biochar e composto no experimento 1 (A), que recebeu adubação química, e no experimento 2 (B), sem adubação. T1: Testemunha sem aplicação de composto e biochar; T2: 10 g de composto kg⁻¹ de solo; T3: 7,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 2,5 g de biochar fresco kg⁻¹ de solo; T4: 5,0 g de composto kg⁻¹ de solo + 5,0 g de biochar fresco kg⁻¹ de solo; T5: 2,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 7,5 g de biochar fresco kg⁻¹ de solo; T6: 10 g de biochar fresco kg⁻¹ de solo; T7: 7,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 2,5 g de biochar oxidado kg⁻¹ de solo; T8: 5,0 g de composto kg⁻¹ de solo + 5,0 g de biochar oxidado kg⁻¹ de solo; T9: 2,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 7,5 g de biochar oxidado kg⁻¹ de solo; T10: 10 g de biochar oxidado kg⁻¹ de solo.

Neste aspecto, Pimenta *et al.* (2019) observaram diminuição nos teores de alguns cátions trocáveis do solo quando a dose de biochar aumentou de 0 para 10.500 kg ha⁻¹. Esses cátions podem ter sido deslocados dos sítios de troca para a solução do solo e então lixiviados. Da mesma maneira, Silva *et al.* (2011) relataram que um aumento nos teores de potássio e fósforo no solo foi acompanhado por redução no teor de Cálcio depois da aplicação de biochar. Entretanto, essa redução está em desacordo com Chan *et al.* (2007), que observaram que o uso de altas doses de biochar resultou em maiores teores de cátions trocáveis. Da mesma maneira, Carvalho *et al.* (2013) observaram um aumento linear do teor de cálcio no solo com o aumento da dose de biochar. Enquanto isso, Petter *et al.* (2012) observaram um aumento de 36% no teor de cálcio do solo em relação à testemunha quando aplicaram 32 Mg ha⁻¹ de biochar.

No experimento dois (Figura 6B), a testemunha apresentou o menor teor absoluto de

cálcio do solo, semelhantes aos teores originais do solo, o qual não diferiu estatisticamente dos tratamentos T4 (0,5% composto + 0,5% biochar fresco), T5 (0,25% composto + 0,75% biochar fresco) e T10 (1,0% biochar oxidado). Esse comportamento dos tratamentos tanto pode ser devido a que o cálcio liberado pelo composto tenha sido consumido pelas plantas ou adsorvido aos sítios de troca do biochar fresco (T4 e T5), como no caso do T10 o cálcio liberado pelo biochar oxidado ou foi consumido pelas plantas ou lixiviado do solo. No experimento dois, o maior teor absoluto de cálcio do solo foi observado no tratamento T8 (0,5% composto + 0,5% biochar oxidado), o qual foi o menor teor de cálcio no experimento um, então tanto composto como biochar liberaram cálcio, mas no experimento dois essa liberação foi intensificada pela oxidação do biochar, conforme foi discutido anteriormente em relação ao biochar com HNO_3 aumentar a solubilidade em água de nutrientes, tornando-os mais disponíveis no solo e tornando-os mais sujeitos à lixiviação (SAHIN *et al.*, 2017).

O teor de cálcio no solo do tratamento T2 do experimento um, que recebeu apenas composto, não diferiu estatisticamente do tratamento T6, que recebeu apenas biochar fresco. Isso concorda com Vandecasteele *et al.* (2016), que afirmam que o biochar e o composto podem conter altos teores de cálcio. Entretanto, T2 proporcionou teor de cálcio no solo 34% menor do que o T10, que recebeu apenas biochar oxidado e pode ter liberado cálcio de forma mais intensa para o solo. Por sua vez, o teor de cálcio no solo do tratamento T2 do experimento dois foi maior, mas não diferiu significativamente do T6, da mesma maneira que no experimento um, nem do T10. Apesar do T10 ter apresentado o menor teor de cálcio entre os três, provavelmente liberou cálcio de forma mais intensa devido à oxidação e essa maior quantidade de cálcio tenha sido lixiviada. Outro aspecto do experimento é a ausência de adubação química e o menor desenvolvimento e menor consumo de cálcio pelas plantas. Em estudo de Bass *et al.* (2016), a aplicação de composto aumentou o teor de matéria orgânica e o teor de cálcio do solo em plantações de banana, tendo a aplicação de composto sozinho sido tão benéfica como quando junto com fertilizante mineral. Por outro lado, Glaser *et al.* (2015) observaram que, após a colheita de milho, o tratamento com composto proporcionou maior aumento do teor de cálcio disponível para as plantas do que o tratamento que recebeu adubo mineral.

O uso de biochar oxidado com H_2O_2 , no experimento um, proporcionou teor de cálcio médio ($0,88 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) ligeiramente maior (5%) do que o uso do biochar fresco ($0,84 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Enquanto isso, no experimento dois, o teor de cálcio do solo observado nos tratamentos que receberam biochar oxidado com HNO_3 foi 10% maior do que o teor de cálcio observado nos tratamentos que receberam biochar fresco. Essa diferença pode ser devida ao fato do experimento dois o biochar ter sido oxidado com HNO_3 , que intensifica a mineralização.

Os tratamentos que apresentaram a mesma proporção (0,5%) de composto e de biochar (T4 e T8) apresentaram teores de cálcio significativamente diferentes no experimento um, no qual o teor de cálcio de T4 foi 60% maior do que o de T8 isso porque o composto liberou cálcio mais efetivamente do que o biochar fresco. No experimento dois, foi o T8 que apresentou teor de cálcio 28% maior do que em T4, apesar da diferença não ser significativa isso porque o biochar oxidado liberou cálcio de maneira mais intensa do que o composto.

Em relação às misturas de biochar e composto, além do destaque para o T10, os melhores resultados no experimento um foram obtidos quando se usou 0,5% composto + 0,5% biochar fresco, 0,75% biochar fresco e 1,0 biochar fresco, ou 0,75% biochar oxidado. No experimento dois, as melhores misturas foram de 0,75% de composto com biochar fresco ou 0,75% de biochar fresco, 0,75% e 0,50% de composto + biochar oxidado, ou 0,75% de biochar oxidado. Isso demonstra que tanto biochar como composto forneceram cálcio e que a presença dos dois materiais na mistura é importante devido às diferentes características de mineralização dos dois materiais. Em estudo de Liu *et al.* (2012), a aplicação da maior dose da mistura de biochar e composto aumentou o teor de cálcio 2,2 vezes quando comparado à testemunha.

A aplicação de Biochar e esse biocarvão mais composto resultou em aumentos significativos nos teores de nutrientes do solo, entre os quais o teor de cálcio que aumentaram 31e 54% comparado ao teor inicial de cálcio do solo Agegnehu *et al.* (2016). Em trabalho de Radin *et al.* (2018), a aplicação tanto de Biochar, como de composto ou biochar mais composto melhoraram as propriedades químicas de um meio de crescimento de mudas em sacos plásticos, como teores de cálcio. A melhoria significativa após a aplicação de biochar foi melhorada ainda mais com a adição de composto, que foram acompanhadas por aumento significativos nos teores de cálcio. Por outro lado, Steiner *et al.* (2007), ao mesmo tempo que relataram aumento significativo dos teores de nutrientes do solo devido a aplicação de composto, entre os quais o cálcio, observaram aumento insignificante do teor de nutrientes quando aplicaram biochar, o qual por ter natureza recalcitrante e baixo conteúdo de nutrientes seria inadequado para ser um fertilizante balanceado.

4.2.6 Teor de Magnésio

O teor de magnésio do solo apresentou efeito significativo dos tratamentos nos dois experimentos (Tabela 9). As médias dos teores de magnésio obtidos no experimento um foram 22% maiores do que os obtidos no experimento dois, cujo coeficiente de variação foi menor. O teor de magnésio no solo foi influenciado pelas cinzas que acompanham o biochar, as quais

adicionam cálcio e magnésio para a solução do solo e o conseqüente aumento do pH do solo melhora a disponibilidade de nutrientes para as plantas. Além disso, o composto também adiciona cálcio e magnésio disponíveis para as plantas, podendo se destacar em relação à aplicação de adubo mineral. Inclusive, o aproveitamento como fertilizante do magnésio contido no composto pode ser de 100% (AGEGNEHU *et al.*, 2015; FISCHER; GLASER, 2012; GLASER *et al.*, 2015; LATAWIEC *et al.*, 2019).

Tabela 9. Resumo da análise de variância do teor de Magnésio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) do solo cultivado com capim Marandu sob efeito de misturas de biochar e composto nos dois experimentos realizados

Fonte de variação	Graus de liberdade		Soma de quadrados		Quadrado médio		Valor de F		Prob >F	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Experimentos*	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Tratamentos	9	9	4,63	6,64	0,51	0,73	3,49	11,64	0,003**	0,0000**
Erro	39	39	5,74	2,47	0,15	0,06	-	-	-	-
Total	48	48	10,37	9,11	-	-	-	-	-	-
¹ CV (%)	19,52	15,64	-	-	-	-	-	-	-	-
Média	1,97	1,61	-	-	-	-	-	-	-	-

¹Coefficiente de variação. **significativo ($p < 0,01$).

No experimento um (Figura 7A), a testemunha apresentou o menor teor absoluto de magnésio do solo, o qual somente diferiu significativamente de T6 (1,0% biochar fresco) e T8 (0,5% composto + 0,5% biochar oxidado). Nos outros tratamentos tanto o composto como o biochar forneceram mais magnésio do que esses três citados. No experimento dois (Figura 7B), os menores teores absolutos de magnésio foram observados na testemunha e no tratamento T3 (0,75% composto + 0,25% biochar oxidado), que somente diferiram estatisticamente de T8 (0,5% composto + 0,5% biochar oxidado), T9 (0,25% composto + 0,75% biochar oxidado) e T10 (1% biochar oxidado). Ou seja, os tratamentos com as maiores proporções de biochar oxidado com HNO_3 foram os que mais forneceram magnésio ao solo, provavelmente porque o HNO_3 tenha intensificado a liberação.

Enquanto no experimento um o maior teor absoluto de magnésio foi observado no tratamento T8, no experimento dois os tratamentos T9 e T10 apresentaram os maiores valores entre todos os tratamentos. Isso indica que o poder oxidante do H_2O_2 é menor do que do HNO_3 , de maneira que o composto do tratamento T8 ajudou a liberar magnésio. Entretanto, no experimento dois a maior disponibilização de magnésio no solo se deveu tanto a que os tratamentos T9 e T10 possuíam a maior quantidade de biochar e também porque a oxidação foi com HNO_3 intensificou a liberação/mineralização do magnésio.

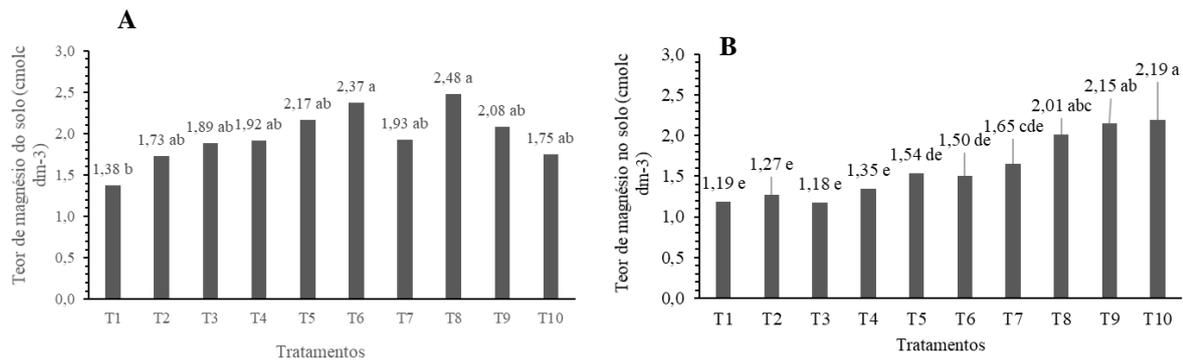


Figura 7. Médias do teor Magnésio do solo cultivado com capim Marandu sob efeito de misturas de biochar e composto no experimento 1 (A), que recebeu adubação química, e no experimento 2 (B), sem adubação. T1: Testemunha sem aplicação de composto e biochar; T2: 10 g de composto kg⁻¹ de solo; T3: 7,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 2,5 g de biochar fresco kg⁻¹ de solo; T4: 5,0 g de composto kg⁻¹ de solo + 5,0 g de biochar fresco kg⁻¹ de solo; T5: 2,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 7,5 g de biochar fresco kg⁻¹ de solo; T6: 10 g de biochar fresco kg⁻¹ de solo; T7: 7,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 2,5 g de biochar oxidado kg⁻¹ de solo; T8: 5,0 g de composto kg⁻¹ de solo + 5,0 g de biochar oxidado kg⁻¹ de solo; T9: 2,5 g de composto kg⁻¹ de solo + 7,5 g de biochar oxidado kg⁻¹ de solo; T10: 10 g de biochar oxidado kg⁻¹ de solo.

Apesar do teor de magnésio expressivo obtido pelo T8 no experimento um, os tratamentos que receberam biochar oxidado tiveram teores de magnésio em média praticamente iguais aos obtidos pelos tratamentos que receberam biochar fresco. Entretanto, existe uma clara superioridade (43%) dos tratamentos que receberam biochar oxidado com HNO₃ no experimento dois, os quais apresentaram teor de magnésio, em média, de 2,0 cmol_c dm⁻³, enquanto os tratamentos que receberam biochar fresco apresentaram teor de magnésio de 1,4 cmol_c dm⁻³. Mais uma vez fica comprovado o maior efeito de mineralização do biochar devido à oxidação com HNO₃.

Não foi observada diferença significativa entre os tratamentos que receberam somente composto, ou somente biochar, no experimento um, apesar do tratamento T6, que recebeu 1,0% de biochar fresco, ter apresentado teor de magnésio 36% maior do que os outros dois tratamentos (T2 e T10). O menor teor de magnésio do solo referente a somente composto pode ser devido à mineralização mais rápida pelo composto e o consumo então mais rápido pelas plantas. No caso do T6, a não oxidação do biochar pode ter diminuído a intensidade de mineralização e assim diminuído perdas de magnésio do solo. No experimento dois, o tratamento T2, que recebeu apenas composto, apresentou menor teor de magnésio do que os tratamentos que receberam apenas biochar, mas não diferiu estatisticamente do tratamento T6, que recebeu biochar fresco. Os tratamentos T2 e T6 apresentaram teores de potássio significativamente menores do que o tratamento T10, que recebeu apenas biochar oxidado e

cujos teores de potássio foram 72% maior do que T2 e 46% maior do que T6. O resultado do T10 indica que a oxidação com HNO_3 proporcionou maior intensidade de mineralização do magnésio contido no biochar.

No experimento um, as misturas que proporcionaram maiores teores de magnésio no solo foram aquelas que continham os maiores teores de biochar fresco (0,75 e 1,0%), o que também foi observado no experimento dois, e 0,50% de biochar oxidado, enquanto as misturas contendo 0,5, 0,75 e 1,0% de biochar oxidado se destacaram no experimento dois. No experimento um, o biochar fresco mineralizou o magnésio mais lentamente de maneira que restou uma quantidade de magnésio no solo sem ser consumida pelas plantas. No experimento dois, os maiores teores de magnésio do solo recebendo as maiores quantidades de biochar oxidado se deve a mineralização mais intensa do magnésio quando a oxidação foi com HNO_3 . No experimento dois é bem visível que os teores de magnésio do solo foram crescentes de acordo com o aumento da proporção de biochar na mistura quando o biochar foi oxidado com HNO_3 .

Quando se compara os tratamentos que receberam a mesma proporção (0,5%) de composto e de biochar (T4 e T8), observa-se que no experimento um o maior teor de magnésio foi obtido no tratamento T8, que recebeu biochar oxidado com H_2O_2 , mas não apresentaram diferença significativa entre eles. No experimento dois o tratamento T8 também apresentou o maior teor de magnésio, 49% maior do que T4. Indicando o efeito da mineralização do biochar com HNO_3 .

4.2.7 Capacidade de troca de Cátions

O efeito dos tratamentos sobre a CTC do solo foi significativo nos dois experimentos (Figura 8). Observa-se que os coeficientes de variação foram semelhantes, mas a média da CTC foi ligeiramente superior no experimento um, o qual recebeu adubação química com nitrogênio e com potássio. A CTC é um parâmetro importante para a retenção de nutrientes inorgânicos importantes para as plantas, entre eles o potássio e o amônio (AGEGNEHU *et al.*, 2015). Segundo Hale *et al.* (2020), a aplicação de Biochar aumenta as cargas negativas nos solos minerais e assim melhora a baixa capacidade de troca de cátions, inerente aos solos tropicais ácidos. O biochar já é carregado negativamente, por isso, sua aplicação ao solo contribui para o aumento da CTC.

Tabela 10. Resumo da análise da análise de variância da Capacidade de Troca de Cátions ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) do solo cultivado com capim Marandu sob efeito de misturas de biochar e composto nos dois experimentos realizados

Fonte de variação	Graus de liberdade		Soma de quadrados		Quadrado médio		Valor de F		Prob >F	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Experimentos*	1	2								
Tratamentos	9	9	33,17	99,06	3,69	11,01	14,20	46,63	0,0000**	0,0000**
Erro	39	39	10,12	9,21	0,20	0,24	-	-	-	-
Total	48	48	43,29	108,26	-	-	-	-	-	-
¹ CV (%)	9,45	9,42	-	-	-	-	-	-	-	-
Média	5,39	5,16	-	-	-	-	-	-	-	-

¹Coefficiente de variação. **significativo ($p < 0,01$).

A testemunha apresentou o menor valor absoluto de CTC no experimento um (Figura 8A), sem haver diferença estatística com o tratamento T2 (1,0% composto), cuja CTC foi 21% maior do que T1. É esperado que a aplicação de composto aumente a CTC do solo (Fischer & Glaser, 2012) porque o composto adiciona ao solo matéria orgânica estabilizada, rica em grupos funcionais. A importância da manutenção da MOS em solos tropicais é que ela pode ser a principal fonte de cargas negativas para a adsorção de cátions trocáveis (Steiner *et al.*, 2007), podendo contribuir com 20 a 70% da CTC de muitos solos (AMLINGER *et al.*, 2007). Em valores absolutos, a CTC da matéria orgânica varia de 300 a 1.400 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ e é muito maior do que a CTC de materiais inorgânicos. Assim sendo, todos os outros tratamentos provocaram aumento significativo da CTC em relação à testemunha. O tratamento que apresentou o maior valor absoluto de CTC foi o T9 (0,25% composto + 0,75% biochar oxidado), cujo valor foi ligeiramente superior ao T8 e T10. Observa-se na figura 8A um aumento pequeno mais constante da CTC, à medida que aumenta a proporção de biochar, com valores ligeiramente superiores para os tratamentos que receberam biochar oxidado com H_2O_2 . Em seu estudo, Huff e Lee (2016) trataram o biochar com diversas concentrações de H_2O_2 e observaram que o aumento da concentração de H_2O_2 promoveu aumento da CTC devido à adição de grupos funcionais oxigenados ácidos à superfície do biochar.

No experimento dois (Figura 8B), a testemunha também apresentou o menor valor absoluto de CTC, que não diferiu estatisticamente do T2, nem dos tratamentos que receberam biochar fresco (T3, T4, T5 e T6). Os tratamentos do experimento dois que receberam biochar oxidado com HNO_3 apresentaram CTC significativamente maior do que a testemunha. No experimento dois fica evidente uma tendência de aumento da CTC, partindo da testemunha e com aumento progressivo conforme aumentava a proporção de biochar fresco, o qual por si só tem capacidade de aumentar a CTC do solo. Entretanto, o aumento da CTC é mais expressivo à medida que aumenta a proporção de biochar oxidado, o que demonstra um dos principais efeitos da oxidação do biochar e que esses efeitos são mais pronunciados pela oxidação com

HNO_3 . A aplicação de biochar está associada ao aumento da CTC do solo e, por isso, aumentar a disponibilidade e retenção de nutrientes para as plantas e a eficiência de uso dos nutrientes (AGEGNEHU *et al.*, 2015). Essa melhoria na CTC que possibilita influencia a ciclagem e reduz a lixiviação de nutrientes (JINDO *et al.*, 2012).

Segundo Glaser *et al.* (2015), a CTC do biochar varia conforme sua matéria prima, as condições de carbonização, o teor de cinzas e o pH do biochar, estando relacionada aos grupos funcionais em sua superfície, como grupos fenólicos OH e grupos carboxílicos, os quais aumentam naturalmente, devido ao “envelhecimento” do biochar no solo. Estes autores, observaram ao final de seu experimento, que a CTC do solo foi maior nos tratamentos que receberam biochar e atribuíram à oxidação da superfície do biochar gerou grupos funcionais carregados negativamente e contendo oxigênio, como carboxílicos, hidroxílicos e fenólicos. Inclusive, os teores de cátions trocáveis do solo que recebeu biochar foram significativamente maiores, comparado ao solo recebendo somente adubo mineral. Por sua vez, Domingues *et al.* (2020) determinaram a CTC de biochar produzido de quatro matérias primas diferentes e submetidos a diferentes temperaturas de pirólise e obtiveram CTC variando entre 1,3 e 72,0 cmolc kg^{-1} , sendo que a CTC aumentou na seguinte ordem: casca de café > esterco de frango > serragem de eucalipto > bagaço de cana. Por outro lado, a CTC do biochar diminuiu conforme a temperatura de pirólise aumentou na seguinte ordem: 350 < 450 < 750 °C. Em outro estudo, Van Zwieten *et al.* (2010) dois tipos de biochar promoveram aumentos de 89 e de 162% na CTC de um Latossolo, em relação à testemunha.

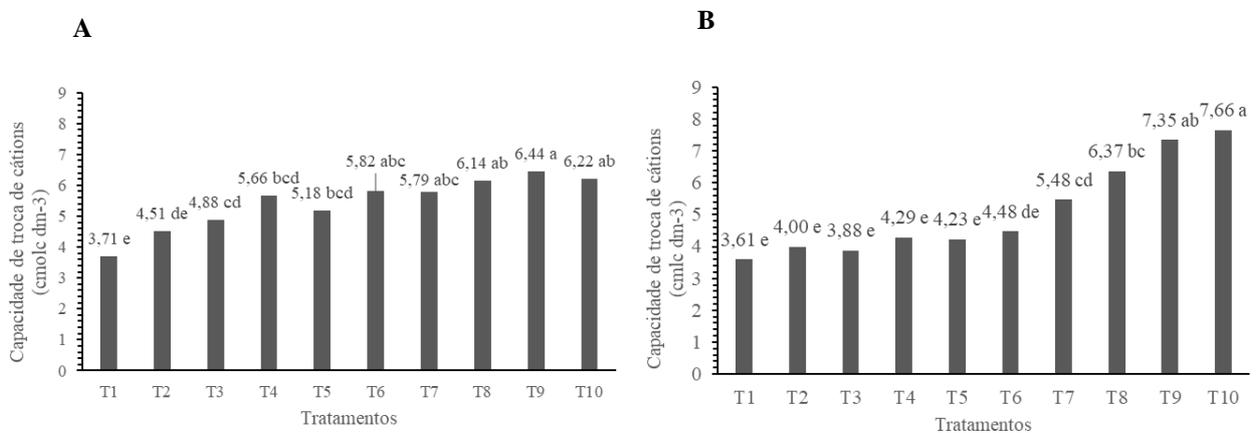


Figura 8. Médias da Capacidade de Troca de Cátions do solo cultivado com capim Marandu sob efeito de misturas de biochar e composto no experimento 1 (A), que recebeu adubação química, e no experimento 2 (B), sem adubação. T1:Testemunha sem aplicação de composto e biochar;

T2: 10 g de composto kg^{-1} de solo; T3: 7,5 g de composto kg^{-1} de solo + 2,5 g de biochar fresco kg^{-1} de solo; T4: 5,0 g de composto kg^{-1} de solo + 5,0 g de biochar fresco kg^{-1} de solo; T5: 2,5 g de composto kg^{-1} de solo + 7,5 g de biochar fresco kg^{-1} de solo; T6: 10 g de biochar fresco kg^{-1} de solo; T7: 7,5 g de composto kg^{-1} de solo + 2,5 g de biochar oxidado kg^{-1} de solo; T8: 5,0 g de composto kg^{-1} de solo + 5,0 g de biochar oxidado kg^{-1} de solo; T9: 2,5 g de composto kg^{-1} de solo + 7,5 g de biochar oxidado kg^{-1} de solo; T10: 10 g de biochar oxidado kg^{-1} de solo.

Os tratamentos que receberam biochar oxidado com H_2O_2 , no experimento um, apresentaram tendência de maior CTC, que foi 14 % maior, em média, do que os tratamentos que receberam biochar fresco. Essa tendência ficou mais clara no experimento dois, no qual os tratamentos que receberam biochar oxidado com HNO_3 apresentaram CTC, em média ($6,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), 59% maior do que os tratamentos que receberam biochar fresco ($4,22 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Conforme discutido por Sahin *et al.* (2017) espera-se que a oxidação com HNO_3 traga modificações mais evidentes ao biochar.

O tratamento T2 do experimento um, que recebeu apenas composto (1,0%) apresentou CTC significativamente menor do que os tratamentos que receberam apenas biochar fresco ou oxidado (T6 e T10), os quais não diferiram estatisticamente entre si. Apesar da capacidade conhecida do composto em aumentar a CTC do solo, a adição de biochar, oxidado ou não, influenciou mais destacadamente a CTC do que o composto. Em relação a T2, os tratamentos T6 e T10 apresentaram CTC 29 e 38% maior, respectivamente. Entretanto, a CTC do solo do tratamento T2 do experimento dois não diferiu estatisticamente da CTC de T6 e foi 48% menor do que a CTC observada no tratamento T10, que recebeu biochar oxidado com HNO_3 .

Quando se compara os tratamentos T4 e T8, que receberam a mesma proporção de composto e de biochar, fresco ou oxidado, observa-se que no experimento um eles não diferiram estatisticamente, apesar do T8 ter apresentado CTC ligeiramente maior. Entretanto, a diferença foi significativa no experimento dois, no qual o T8, que recebeu biochar oxidado com HNO_3 , apresentou CTC 49% maior do que T4, que recebeu biochar fresco. Isso evidencia a maior ação oxidante do biochar proporcionada pelo HNO_3 , em relação ao H_2O_2 .

Em relação às misturas de biochar com composto, no experimento um a CTC foi superior nas misturas com 0,5, 0,75 e 1,0% de biochar, oxidado ou não, enquanto no experimento dois, a tendência de superioridade se apresentou para as proporções de 0,75 e 1,0% de biochar oxidado. Mais uma vez evidencia a capacidade do biochar aumentar a CTC do solo, mas isso é mais intenso se o biochar for oxidado. Em estudo de Agegnehu *et al.* (2016) foram testados biochar sozinho ou em mistura com composto, sendo que, em relação à testemunha, o biochar sozinho aumentou a CTC em 20%, enquanto o biochar misturado com composto

aumentou a CTC em 41%. Neste contexto, Agegnehu *et al.* (2015) indicam que a aplicação ao solo de Biochar e o biocarvão mais composto influencia positivamente a fertilidade do solo pelo aumento da CTC e assim por maior disponibilidade de nutrientes no solo e pode aumentar a retenção de cátions mesmo em solos não ácidos. Em estudo de Radin *et al.* (2018) aplicação de Biochar, composto e biochar mais composto em meio de cultivo de mudas em sacos plásticos melhoraram as propriedades químicas do meio de cultivo, entre as quais a CTC. Os autores verificaram aumento da CTC pela aplicação de biochar e aumento ainda maior quando posteriormente aplicaram composto. No estudo de Glaser *et al.* (2015) a CTC do solo ao final do experimento foi significativamente maior no tratamento que recebeu composto do que no solo que recebeu fertilizante mineral. Além disso, os autores observaram que a adição de pelo menos 10 Mg ha⁻¹ de Biochar ao composto aumentou ainda mais a CTC

4.2.8 Percentagem de Sódio Trocável

O efeito dos tratamentos sobre a PST do solo foi significativo na probabilidade de 5%, no experimento um. Nesse experimento foi realizada adubação química com nitrogênio e potássio e nos tratamentos que receberam biochar oxidado, a oxidação foi realizada com H₂O₂. Enquanto isso, o efeito dos tratamentos foi significativo no experimento dois (Tabela 11), que não recebeu adubação química e recebeu o HNO₃ para oxidação do biochar. Os coeficientes de variação nos dois experimentos foram semelhantes, mas a PST média foi 18% maior no experimento um. A recuperação de solos salinizados tem sido feita com aplicação de lâmina de água que lixivia o excesso de sais, além de gesso ou matéria orgânica, como é o caso do composto. A adição de matéria orgânica melhora a agregação do solo e diminui a dispersão promovida pelo sódio, beneficiando a condutividade hidráulica, taxa de infiltração e retenção de água e nutrientes no solo. A decomposição da matéria orgânica reduz a percentagem de sódio trocável, porque libera CO₂ e ácidos orgânicos, além de cálcio e magnésio, que deslocam o sódio. Por sua vez, o biochar tem efeito de sorção de sais, mitigando seus efeitos osmóticos e de toxicidade iônica, com efeito semelhante ao carvão ativado, que tem alta capacidade de absorver sais e é usado em processos industriais de dessalinização (COSTA *et al.*, 2018).

Tabela 11. Resumo da análise da análise de variância da Percentagem de Sódio Trocável do solo cultivado com capim Marandu sob efeito de misturas de biochar e composto nos dois experimentos realizados

Fonte de variação	Graus de liberdade		Soma de quadrados		Quadrado médio		Valor de F		Prob >F	
Experimentos*	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2

Tratamentos	9	9	143,90	309,69	15,99	34,41	2,13	6,25	0,04*	0,0000**
Erro	39	39	292,25	214,73	7,49	50,51	-	-	-	-
Total	48	48	436,15	524,42	-	-	-	-	-	-
¹ CV (%)	25,10	25,50	-	-	-	-	-	-	-	-
Média	10,90	9,20	-	-	-	-	-	-	-	-

¹Coefficiente de variação. **significativo (p<0,01); *significativo (p<0,05).

Apesar do efeito significativo dos tratamentos sobre a PST do solo, verificado pelo teste F no experimento um, não foi possível estabelecer diferença entre as médias pelo teste de Tukey. Mesmo assim, verifica-se tendência (Figura 9A) de maiores PST no tratamento T2 (1,0% composto), na testemunha e no T3, que recebeu a menor quantidade de biochar fresco (0,25%). Além disso, pode-se verificar a tendência de que os tratamentos que receberam as maiores quantidades de biochar oxidado com H₂O₂ tenham apresentado as menores PST. Segundo Akhtar *et al.* (2015), devido a sua alta capacidade de adsorção, o biochar reduz a absorção de sódio pelas plantas por meio de ligação transitória com Na⁺, causando diminuição no estresse osmótico pelo aumento no teor de água do solo, e pela liberação de nutrientes minerais como potássio, cálcio e magnésio para a solução do solo.

Por outro lado, as diferenças entre os tratamentos são bem claras no experimento dois (Figura 9B). Neste experimento, as maiores PST foram observadas na testemunha e no tratamento T6 (1,0% biochar fresco) e as menores foram observadas no tratamento T5 (0,25% composto + 0,75% biochar fresco) e no T10 (1,0% biochar oxidado), que apresentou o menor valor absoluto de PST. O resultado proporcionado pelo T6 encontra paralelo com estudo de Pimenta *et al.* (2019) que observaram aumento da PST de 22,6 para 27,0 % (19%) quando a dose de biochar aumentou de 0 para 10.500 kg ha⁻¹. Esse aumento pode ser explicado tanto pela diminuição nos teores de cálcio e magnésio do solo como pelo aumento no teor de sódio do solo causado pela aplicação de biochar. Segundo Verheijen *et al.* (2010), os sais contidos no biochar podem ser fontes de salinização secundária. O conteúdo de sais nas cinzas do biochar depende da composição de sua matéria prima, que contém sódio em menores quantidades do que outros elementos. Entretanto, a testemunha somente diferiu significativamente dos tratamentos T5, T9 (0,25% composto + 0,75% biochar oxidado) e T10. Estes resultados mostram a ação do biochar em reduzir a PST do solo, mas indicam que este efeito depende de haver alguma proporção de composto em mistura.

No experimento um, o tratamento T2, que recebeu apenas composto, apresenta tendência de maior PST do que os tratamentos T6 e T10, que receberam apenas biochar, fresco ou oxidado, entre os quais o T6 tende a ter maior PST. A PST proporcionada pelo T2 está de acordo com resultado obtido ao final do experimento de Glaser *et al.* (2015), no qual, assim

como outros nutrientes, foi observado aumento significativo do teor de sódio do solo tratado com composto. Por outro lado, a grande quantidade de biochar adicionada ao solo pelo T10 pode ter liberado quantidades significativas de cálcio e magnésio. Além disso, o fato do experimento um ter recebido adubação com potássio pode ter promovido a predominância desse nutriente no solo, em relação a sódio. Entretanto, no experimento dois, o tratamento T6, que recebeu apenas biochar fresco é o que apresenta maior PST, a qual não diferiu estatisticamente de T2, mas foi estatisticamente maior do que T10 em 123%.

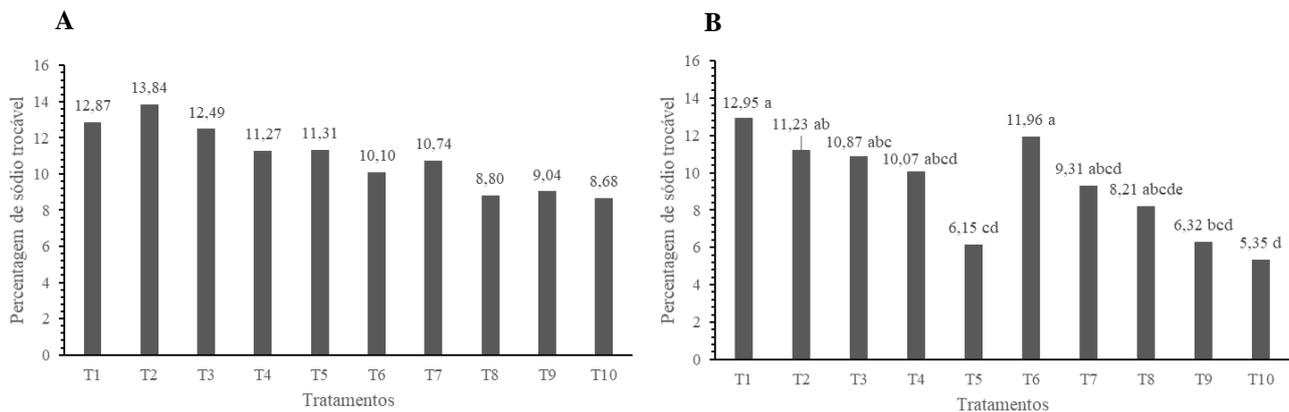


Figura 9. Médias da Percentagem de Sódio Trocável (%) do solo cultivado com capim Marandu sob efeito de misturas de biochar e composto no experimento 1 (A), que recebeu adubação química, e no experimento 2 (B), sem adubação. T1: Testemunha sem aplicação de composto e biochar; T2: 10 g de composto kg^{-1} de solo; T3: 7,5 g de composto kg^{-1} de solo + 2,5 g de biochar fresco kg^{-1} de solo; T4: 5,0 g de composto kg^{-1} de solo + 5,0 g de biochar fresco kg^{-1} de solo; T5: 2,5 g de composto kg^{-1} de solo + 7,5 g de biochar fresco kg^{-1} de solo; T6: 10 g de biochar fresco kg^{-1} de solo; T7: 7,5 g de composto kg^{-1} de solo + 2,5 g de biochar oxidado kg^{-1} de solo; T8: 5,0 g de composto kg^{-1} de solo + 5,0 g de biochar oxidado kg^{-1} de solo; T9: 2,5 g de composto kg^{-1} de solo + 7,5 g de biochar oxidado kg^{-1} de solo; T10: 10 g de biochar oxidado kg^{-1} de solo.

Uma observação que pode ser feita sobre o experimento dois (Figura 9B) é que nos tratamentos que receberam biochar oxidado a PST diminui à medida em que aumenta a proporção de biochar aplicado. Essa observação poderia ser aplicada aos tratamentos que receberam biochar fresco, porém o tratamento T6, que recebeu 1,0% de biochar fresco apresentou uma elevada PST, em termos absolutos. Mesmo assim, ficou evidenciado que os tratamentos que receberam biochar oxidado com HNO_3 apresentaram em média (9,8%) valores 25% menores de PST do que os tratamentos que receberam biochar fresco (7,3%).

A comparação entre os tratamentos do experimento um que receberam a mesma proporção de composto e de biochar (T4 e T8) mostra a tendência de maior PST (28%) no tratamento que recebeu biochar fresco (T4). Esta mesma tendência é verificada no experimento

dois, no qual esses tratamentos não diferiram estatisticamente, mas o T4 apresentou PST 23% maior do que T8.

Em solos cuja produtividade é muito limitada por diferentes tipos de degradação, entre as quais a salinização, a aplicação de condicionadores de solo contendo biochar é uma prática promissora para a qualidade do solo. No estudo de Luo *et al.* (2017) foram aplicadas concentrações entre 0 e 10% base peso de um condicionador contendo biochar e composto e testado seu efeito de sobre duas espécies vegetais. A aplicação de 1,5% deste material melhorou muito o crescimento das plantas, mas este crescimento foi inibido pela concentração de 10%. No caso da promoção do crescimento, este efeito foi atribuído à melhoria de propriedades do solo, como diminuição no teor de sódio e na PST, ao passo que a inibição do crescimento verificado na maior concentração de biochar com composto (10 %) foi atribuído ao aumento acentuado da salinidade do solo. Diante dos resultados, os autores ressaltam a importância de que um condicionador de solo contendo biochar e composto possua as características adequadas e seja aplicado em doses ótimas para atender aos resultados esperados.

5. CONCLUSÕES

Os tratamentos proporcionaram diferentes respostas das variáveis analisadas, em relação à testemunha, mas nenhum deles se destacou positivamente ou negativamente sobre todas as variáveis.

Os efeitos positivos sobre as variáveis foram maiores quando o biochar foi oxidado com H_2O_2 ou com HNO_3 , com exceção do pH do solo, prejudicado pelo biochar oxidado com HNO_3 .

Em relação aos tratamentos contendo apenas um dos materiais, o composto proporcionou os maiores teores de fósforo no solo, o biochar fresco apresentou o maior pH do solo e as outras variáveis foram beneficiadas quando se aplicou somente biochar oxidado.

Em geral, as diferentes misturas de biochar com composto apresentaram algum efeito positivo sobre todas as variáveis, sem destaque para nenhuma mistura. Por isso, o uso de mistura de proporções iguais de composto e biochar permite obter os benefícios próprios de cada material.

REFERÊNCIAS

- AGEGNEHU, G.; SRIVASTAVA, A.K.; BIRD, M.I. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review. **Applied Soil Ecology**, [s.l.], p.119, 156–170, 2017.
- ALBURQUERQUE, J.A.; SALAZAR, P.; BARRÓN, V. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels. **Agronomy for Sustainable Development**. [s.l.] 33, 475–484 (2013)
- AMLINGER, F.; PEYR, S.; GESZTI, J.; DREHER, P.; KARLHEINZ, W.; NORTCLIFF, S. **Beneficial effects of compost application on fertility and productivity of soils**. Literature Study, Federal Ministry for Agriculture and Forestry, Environment and Water Management, Austria, 2007.
- ASAI, H.; SAMSON, B. K.; STEPHAN, H. M.; SONGYIKHANGSUTHOR, K.; HOMMA, K.; KIYONO, Y.; INOUE, Y.; SHIRAIWA, T.; HORIE, T. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos. 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. **Field Crops Research**, [s.l.], v.111, p.1-2, 2009.
- ATKINSON, C.J.; FITZGERALD, J.D.; HIPPS, N.A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. **Plant Soil**, [s.l.], v.337, p. 1–18, 2010.
- BARCELOS, A. F.; LIMA, J. A. de; PEREIRA, J. P.; GUIMARÃES, P. T. G.; EVANGELISTA, A. R.; GONÇALVES, C. C. de M. **Adubação de capins do gênero Brachiaria**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2011. 84 p.
- BARNES, R. T.; GALLAGHER, M. E.; MASIELLO, C. A.; LIU, Z.; DUGAN, B. Biochar-induced changes in soil hydraulic conductivity and dissolved nutrient fluxes constrained by laboratory experiments. **PLoS ONE**, [s.l.], 9(9): e108340.
- BASS, A. M.; BIRD, M. I.; KAY, G.; MUIRHEAD, B. Soil properties, greenhouse gas emissions and crop yield under compost, biochar and co-composted biochar in two tropical agronomic systems. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v.550, p.459–470.
- BIEDERMAN; L. A.; HARPOLE, W. S. Biochar and its effects on plant productivity and 62nutriente cycling: a meta-analysis. **Bioenergy**, [s.l.], v. 5, n. 2, p. 202–214, 2013.
- BLANCO-CANQUI, H. Biochar and soil physical properties. **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.], v.8, n.1, p. 687–711, 2017.
- BROCKHOFF, S. R.; CHRISTIANS, N. E.; KILLORN, R. J.; HORTON, R.; DAVIS, D. D. Physical and mineral nutrition properties of sand-based turfgrass root zones amended with biochar. **Agronomy Journal**, [s.l.], v. 102, p.1627–1631, 2010.

- BRUNO G.; KATJA W.; SEBASTIAN S.; HANS-PETER S.; HELMUT G. Biochar organic fertilizers from natural resources as substitute for mineral fertilizers. **Agronomy for Sustainable Development**. [s.l.], v.35, p.667–678, 2015.
- BUTTLER, T.J.; MUIR, P.M. Dairy manure compost improves soil and increase tall wheatgrass yield. **Agronomy Journal**, [s.l.], v.98, p.1090-1096, 2006.
- CARTER, S.; SHACKLEY, S.; SOHI, S.; SUY, T. B.; HAEFELE, S. The Impact of Biochar Application on Soil Properties and Plant Growth of Pot Grown Lettuce (*Lactuca sativa*) and Cabbage (*Brassica chinensis*). **Agronomy**, [s.l.], v. 3, p. 404-418, 2013.
- CARVALHO, M. T.M.; MADARI, B. E.; BASTIAANS, L.; VAN OORT, P. A. J.; HEINEMANN, A. B.; DA SILVA, M. A. S.; MAIA, A. H. N. M.; MEINKE, H. Biochar improves fertility of a clay soil in the Brazilian Savannah: short term effects and impact on rice yield. **Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics**. [s.l.], 2013, v.114, n.2, 101-107, 2013.
- CARVALHO, M. T. de M.; MAIA, A. de H. N.; MADARI, B. E.; BASTIAANS, L.; VAN OORT, P. A. J.; HEINEMANN, A. B.; SILVA, M. A. S. da; PETTER, F. A.; MARIMON JUNIOR, B. H.; MEINKE, H. Biochar increases plant-available water in a sandy loam soil under an aerobic rice crop system. **Solid Earth**, [s.l.], v.5, p. 939-952, 2014.
- CARVALHO, M. T. DE M.; MADARI, B. E.; BASTIAANS, L.; OORT VAN, PEPIJN, A. J.; HEINEMANN, A. B.; SILVA, M. A. S. DA; MAIA, A. DE H. N.; MEINKE, H. Biochar improves fertility of a clay soil in the brazilian savannah: short term effects and impact on rice yield. **Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics**, [s.l.], v.114, n.2, p.101-107, 2013.
- CASAROLI, D.; VAN LIER, Q. J. Critérios para determinação da capacidade de vaso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v.32, n.1p.59–66, 2008.
- CASTILLO, C. R.; RUBIO, A.; CONTRERAS, Y F. BORIE. Hongos micorrizógenos arbusculares en un Ultisol de la IX Región fertilizado orgánicamente. **Revista de la Ciencia del Suelo y Nutricion Vegetal**, [s.l.], v.4, n.2, p.39-47, 2004.
- CESTARO, L. A.; SOARES, J. J. Variações florística e estrutural e relações fitogeográficas de um fragmento de floresta decídua no Rio Grande do Norte, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, [s.l.], v.18, n.2, p.203–218, 2004.
- CHAN, K. Y.; VAN ZWIETEN, L.; MESZAROS, I.; DOWNIE, A.; JOSEPH, S. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. **Australian Journal of Soil Research**, [s.l.], v.45, n.8, p.629–634, 2007.
- CHAN, K. Y.; XU, Z. Biochar: Nutrient Properties and Their Enhancement. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S.D., Eds., Biochar for Environmental Management. **Science and Technology**, [s.l.], p. 67-84, 2009.

DANLIAN, H.; YANG, W.; CHEN, Z.; GUANGMING, Z.; CUI, L.; JIA W.; LEI, Q.; YALAN Z. Influence of morphological and chemical features of biochar on hydrogen peroxide activation: implications on sulfamethazine degradation. **RSC Advances**, [s.l.], v.6, 2016.

DASHUAN, T.; SHULI, N. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition. **Environmental Research Letters**. [s.l.], v.10, 2015.

CARMO, D. L. DO; SILVA, C. A. Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v.36, n.4, p.1211-1220, 2012.

DISPENZA, V.; DE PASQUALE, C.; FASCELLA, G.; MAMMANO, M. M.; ALONZO, G. Use of biochar as peat substitute for growing substrates of *Euphorbia × lomi* potted plants. **Spanish Journal of Agricultural Research**, [s.l.], v.14, n.4, 2017.

DOWNIE, A.; CROSKY, A.; MUNROE, P. Physical properties of biochar. In: Lehmann J, Joseph S (eds) **Biochar for environmental management: science and technology**, [s.l.], p.13–32, 2009.

STENTIFORD, E.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A. Past, present and future of composting research. **Acta Horticulturae**, [s.l.], 1146, 2016.

ENDERS, A.; LEHMANN, J. Comparison of wet-digestion and dry ashing methods for total elemental analysis of biochar. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [s.l.], v.43, n.7, p.1042–1052, 2012.

EVANYLO, G.; SHERONY, C.; SPARGO, J.; STARNER, D.; BROSIUS, M.; HAERING, K. Soil and water environmental effects of fertilizer-, manure-, and compost-based fertility practices in an organic vegetable cropping system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s.l.], v.127, n.1-2, p.50–58, 2008.

DA COSTA VERDADE, F. Ação da água oxigenada sobre a matéria orgânica do solo. **Bragantia**, [s.l.], v.13 n. único, 1954.

SILVA, F. C. DA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.

FIGUEIREDO, A. L. **Pirólise termoquímica de pós da fibra de coco seco em um reator de cilindro rotativo para produção de bio-óleo**. Natal, 2011. 126 f. Dissertação (mestrado). UFRN, Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo.

FISCHER, D.; GLASER, B. Synergisms between compost and biochar for sustain-able soil amelioration. In: Kumar, S., Bharti, A. (Eds.), **Management of Organic Waste**, [s.l.], p.167–198, 2012.

AGEGNEHU, G.; PAUL N. NELSON; BIRD, M. I. The effects of biochar, compost and their mixture and nitrogen fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of barley grown on a Nitisol in the highlands of Ethiopia. **Science of the Total Environment**, [s.l.], p.569–570, 2016.

- AGEGNEHU, G.; BASS, A. M.; NELSON, P. N.; BIRD, M. I. Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v.543, p.295–306, 2016.
- GLASER, B.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. The "Terra Preta" phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. **Naturwissenschaften**, [s.l.], v.88, n.1, p.37-41, 2001.
- GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. **Biology and Fertility of Soils**, [s.l.], v.35, p.219–230, 2002.
- GUARDA, V. D. A.; GUARDA, R. D. A. Brazilian tropical grassland ecosystems: distribution and research advances. **American Journal of Plant Science**, [s.l.], v.5, n.7, p.924-932, 2014.
- GRAEF, H.; D. KIOBIA, P.; SAIDIA, F.; KAHIMBA, F. G.; EICHLER-LÖBERMANN, B. Combined effects of biochar and fertilizer application on maize production in dependence on the cultivation method in a sub-humid climate, **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [s.l.], v.49, n.22, p.2905-2917, 2018.
- HAGEMANN, N.; JOSEPH, S.; SCHMIDT, H. P.; KAMMANN, C. I.; HARTER, J. Organic coating on biochar explains its nutrient retention and stimulation of soil fertility. **Nature Communications**, [s.l.], v.8, n.1089, 2017.
- RODRIGUES, H.; LEITE, V. M. R. C.; FREITAS, G. A. DE I. M. DE O.; LIMA, S. O. Aspectos produtivos do capim marandu submetido a adubação fosfatada em níveis de saturação por bases. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, [s.l.], v.10, p.25-32, 2020.
- J. F. L. FILHO; SILVA, J. S. DA; BARBOSA, C. F. Aging of biochar-based fertilizers in soil: Effects on phosphorus pools and availability to *Urochloa brizantha* grass, **Science of the Total Environment**, [s.l.], 2019.
- JANK, L.; BARRIOS, S. C.; VALLE, C. B. DO; SIMEAO, R. M.; ALVES, G. F. 2014. The value of improved pastures to Brazilian beef production. **Crop & Pasture Science**. [s.l.], v.65, p.1132–1137, 2014.
- JANZEN, H. H. The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? **Soil Biology & Biochemistry**, [s.l.], v.38, p.419–424, 2006
- JEFFERY, S.; VERHEIJEN, F. G. A.; VAND DER WELDE M.; BASTOS, A. C. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s.l.], v.144, n.1, p.175–187, 2011.
- JEFFERY, S.; ABALOS, D.; SPOKAS, K.; VERHEIJEN, F. G. A. **Biochar effects on crop yields**. In: Lehmann, J. & Joseph, S. D (eds.). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* 2ed. London: Routhledge, 2015. p. 302-325.
- JEFFERY, S. Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. **Environmental Research Lett**, [s.l.], v.12, n.5, 2017.

- JEFFERY, S.; VERHEIJEN, F. G. A.; VAN DER WELDE, M.; BASTOS, A. C. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, [s.l.], v.144, n.1, p.175–187, 2011.
- PEZZOPANE, J. R. M.; SANTOS, P. M.; CRUZ, P. G. DA; BOSIC, C.; SENTELHAS, P. C. An integrated agrometeorological model to simulate Marandu palisade grass productivity. *Field Crops Research*, [s.l.], v.224, p.13–21, 2021.
- KAMMANN, C. I.; LINSEL, S.; GÖßLING, J. W.; KOYRO, H. W. Influence of biochar on drought tolerance of *Chenopodium quinoa* Willd and on soil–plant relations. *Plant and Soil*, [s.l.], v.345, p.195–210, 2011.
- KEIJI JINDO, A.; KOKI SUTO, B.; KAZUHIRO MATSUMOTO B.; CARLOS GARCÍA A.; TOMONORI SONOKI, B.; MIGUEL A. Sanchez-Monedero a Chemical and biochemical characterisation of biochar-blended composts prepared from poultry manure. *Bioresource Technology*, [s.l.], v.110, p.396–404, 2012.
- KIM, H.; KIM, K.; KIM, H.; YOON, J.; YANG, J. E.; OK, Y. S.; OWENS, G.; KIM, K. EFFECT KISHIMOTO S, SUGIRA G (1985) Biochar as a soil conditioner. In: Symposium on forest product research international: achievements and the future, Pretoria, Proceedings, *National Timber Research Institute*, Pretoria, v.5., p. 22–26, 2015.
- KOTSCHI, J. **A soiled reputation. Adverse impacts of mineral fertilizers in tropical agriculture.** Berlin: Heinrich Böll Foundation; WWF Germany, 2015. 58 p.
- LAIRD, D.; FLEMING, P.; WANG, B.; HORTON, R.; KARLEN, D. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, [s.l.], v.158, p.436–442, 2010.
- LEHMAN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management. In: Lehmann J, Joseph S (eds) **Biochar for environmental management: science and technology**, 1st edn. Earthscan, London, p.1-5, 2009.
- LEHMAN, 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 biochar amendments. *Plant Soil*, The Hague v.249, n.2, p.343–357, 2003.
- LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management: na introduction.** In: Lehmann J, Joseph S (eds). *Biochar for environmental management science and technology*. London: Earth Scan, 2009, p. 1-5.
- LEHMANN, J. A. handfull of carbon. *Nature*, [s.l.], v.447, p.143-144, 2007.
- LEHMANN, J.; GAUNT, J.; RONDON, M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – a review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, [s.l.], v.11, p.403–427, 2006.

LEHMANN, J.; RILLIG, M. C.; THIES, J.; MASIELLO, C. A.; HOCKADAY, W. C.; CROWLEY, D. Biochar effects on soil biota – a review. **Soil Biology and Biochemistry**, [s.l.], v.43, n.9, p.1812-1836, 2011.

LEIFELD, J.; SIEBERT, S.; KÖGEL-KNABNER, I. Changes in the chemical composition of soil organic matter after application of compost. **European Journal of Soil Science**, [s.l.], v.53, p.299-309, 2002.

LIANG, B.; LEHMANN, J.; SOLOMON, D.; KINYANGI, J.; GROSSMAN, J.; O'NEILL, B.; SKJEMSTAD, J. O.; THIES, J.; LUIZÃO, F. J.; PETERSEN, J.; NEVES, E. G. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.], v.70, n.5; p.1719–1730, 2006.

LIANG, B.; LEHMANN, J.; SOLOMON, D.; KINYANGI, J.; GROSSMAN, J.; O'NEILL, B.; SKJEMSTAD, J. O.; THIES, J.; LUIZÃO, F. J.; PETERSEN, J.; NEVES, E. G. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.], Madison, v.70, n.5, p.1719–1730, 2006.

LIMA, L. B. **Desempenho agrônomo da soja, fertilidade e dinâmica da matéria orgânica em solo sob aplicação de biochar no cerrado brasileiro**. 2011, 78 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - UFG, Goiânia:2014.

LIMA, S. L. **Interações entre macronutrientes e biochar no desenvolvimento de mudas de espécies arbóreas**. Nova Xavantina, 2015. 71f.: il. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Conservação) - Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT. Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação, 2015.

BIEDERMAN, L. A.; HARPOLE, W. S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. **GCB Bioenergy**, [s.l.], v.5, p.202–214, 2013.

DELEVATTI, L. M.; CARDOSO, A. S.; BARBERO, R. P.; R LEITE, G.; ROMANZINI, E. P.; RUGGIERI A. C.; REIS, R. A. Effect of nitrogen application rate on yield, forage quality, and animal performance in a tropical pasture. **Scientific Reports**, [s.l.], v.9, 2019.

WONG, M. T. F.; NORTCLIFF S.; SWIFT, R. S. Method for determining the acid ameliorating capacity of plant residue compost, urban waste compost, farmyard manure, and peat applied to tropical soils, **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [s.l.], v.29, n.19-20, p.2927-2937, 1998.

GALDOS, M. V.; BROWN, E.; ROSOLEM, C. A.; PIRES, L. F.; HALLETT, P. D.; MOONEY, S. J. Brachiaria species influence nitrate transport in soil by modifying soil structure with their root system. **Scientific Reports**, [s.l.], v.10, 2020.

MADARI, B. E.; COSTA, A. R.; CASTRO, L. M.; SANTOS, J. L. S.; BENITES, V. M.; ROCHA, A. O.; MACHADO, P. L. O. A. **Carvão vegetal como condicionador de solo para arroz de terras altas (cultivar Primavera): um estudo prospectivo**. Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás 6 p. (Comunicado Técnico, 125), 2006.

MADARI, B. E.; CUNHA, T. J. F.; NOVOTNY, E. H.; MILORI, D. M. B. P.; MARTIN NETO, L.; BENITES, V. M.; COELHO, M. R.; SANTOS, G. A. **Matéria orgânica dos solos**

antrópicos da Amazônia (terra preta de índio): suas características e papel na sustentabilidade da fertilidade do solo. In: Teixeira WG, Kern DC, Madari BE, Lima HN, Woods W (eds) *As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas*, 1st edn. Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus, pp 172–188. 2009

MADARI, B. E.; COSTA, A. R. da; CASTRO, L. M. de; SANTOS, J. L S.; BENITES, V. M.; ROCHA, A. O.; MACHADO, P. L. O. A. **Carvão vegetal como condicionador de solo para arroz de terras altas (cultivar Primavera): um estudo prospectivo.** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006, 6 p. (Comunicado Técnico, 125).

MANGRICH, A. S.; MAIA, C. M. B. F. NOVOTNY. E. H. Biocarvão as Terras Pretas de índios e o sequestro de carbono. **Ciência Hoje**, [s.l.], v.47, n.281, p.48-52, 2011.

BEZERRA, M. G. S.; SILVA, G. G. C. DA; DIFANTE, G. DOS S.; EMERENCIANO NETO, J. V.; OLIVEIRA, E. M. M.; OLIVEIRA, L. E. C. DE. Cassava wastewater as organic fertilizer in 'Marandu' grass pasture. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v.21, n.6, p.404-409, 2017.

MARIMON JUNIOR, B. H.; PETTER, F. A.; ANDRADE, F. R.; MADARI, B. E.; MARIMON, B. S.; SCHOSSLER, T. R.; GONÇALVES, L. G.; BELÉM, R. Produção de mudas de jiló em substrato condicionado com Biochar. **Comunicata Scientiae**, [s.l.], v.3, n.2, p.108-114, 2012.

MARTIN, S. L.; CLARKE, M. L.; OTHMAN, M.; RAMSDEN, S. J.; WEST, H. M. Biochar-mediated reductions in greenhouse gas emissions from soil amended with anaerobic digestates. **Biomass and Bioenergy**, [s.l.], v.79, p.39-49, 2015.

HUFF, M. D.; LEE, J. W. Biochar-surface oxygenation with hydrogen peroxide. **Journal of Environmental Management**, [s.l.], v.165, n.1, p.17-21, 2016.

MIA, S.; DIJKSTRA, F.A.; SINGH, B. **Long ter aging of biochar: a molecular undrstanding with agricultural and environmental implications.** *Advances In Agronomy*, 141. San Diego: Academic Press, 2017. p.1-51.

SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A.; CAYUELA, M. L.; SÁNCHEZ-GARCÍA, M.; VANDECASTEELE, B.; D'HOSE, T.; LÓPEZ, G.; MARTÍNEZ-GAITÁN, C.; KUIKMAN, P. J.; SINICCO, T.; MONDINI, C. Agronomic Evaluation of Biochar, Compost and Biochar-Blended Compost across Different Cropping Systems: Perspective from the European Project FERTIPLUS. **Agronomy**, [s.l.], v.9, n.225, 2009.

MIRANDA, N. O.; PIMENTA, A. S.; SILVA, G. G. C.; OLIVEIRA, E. M. M.; CARVALHO, M. A. B. Biochar as soil conditioner in the succession of upland rice and cowpea fertilized with nitrogen. **Revista Caatinga**, [s.l.], v.30, n.2, p.313–323, 2017.

MIYASAKA, S.; OHKAWARA, T.; NAGAI, K.; YAZAKI, H.; SAKITA, M. N. **Técnicas de produção e uso do fino carvão e Licor Pirolenhoso.** In: Encontro de Processos de Proteção de Plantas; Controle Ecológico de Pragas e Doenças, 1, Botucatu. Resumos. Botucatu: APAN, p 161–176, 2001.

MORALES, M.M. (2010) **Efeito do biocarvão sobre o comportamento da matéria orgânica e do fósforo em solo degradado**. Botucatu. 88 p. Tese (Doctoral Thesis) - Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP

NELSON, N.; AGUDELO, S.; YUAN, W. GAN, J. Nitrogen and phosphorus availability in biochar-amended soils. **Soil Science**, [s.l.], v.176, p.218–226, 2011.

NEVES, E. G. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.], v.70, p.1719–1730, 2006.

MIRANDA, N. DE O.; PIMENTA, A. S.; SILVA, G. G. C. DA; OLIVEIRA, E. M. M.; CARVALHO, M. A. B. DE. Biochar as soil conditioner in the succession of upland rice and cowpea fertilized with nitrogen. **Revista Caatinga**, [s.l.], v.30, n.2, p.313-323, 2017.

NIKOLAS HAGEMANN, CLAUDIA I KAMMANN, HANS-PETER SCHMIDT, ANDREAS KAPPLER, SEBASTIAN BEHRENS. Nitrate capture and slow release in biochar amended compost and soil. **PLoS ONE**, [s.l.], v.12, n.2, 2017.

NÓBREGA, I. P. C. **Efeitos do biochar nas propriedades físicas e químicas do solo: sequestro de carbono no solo**. 2011. 38 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.

NOVOTNY E.H., AZEVEDO E.R., BONAGAMBA T.J., CUNHA T.J.F., MADARI B.E., BENITES V.M., HAYES M.H.B. **Studies of the compositions of humic acids from amazonian dark earth soils**. Karlsruhe: Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.

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**, [s.l.], v.39, n.2, p.321-344, 2015.

NOVOTNY, E.; HAYES, M. H. B.; MADARI, B. E.; BONAGAMBA, T. J.; AZEVEDO, E. R. DE; SOUZA, A. A. DE; SONG, G.; NOGUEIRA, C. M.; MANGRICH, A. S. Lessons from the Terra Preta de Índios of the Amazon Region for the utilization of charcoal for soil amendment. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, [s.l.], v.20, p.1003-1010, 2009.

NOVOTNY, E. H.; MAIA, C. M. B. DE F.; CARVALHO, M. T. DE M. O.; MADARI, B. E. Biochar: pyrogenic carbon for agricultural use - a critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** [online], v.39, n.2, p.321-344, 2015.

SAHIN, O.; TASKIN, M. B.; KAYA, E. C.; ATAKOL, O.; EMIR, E.; INAL, A.; GUNES, A. Effect of acid modification of biochar on nutrient availability and maize growth in a calcareous soil. **Soil Use and Management**, [s.l.], v.33, n.447, 2017.

OGUNTUNDE, P. G.; FOSU, M.; AJAYI, A. E.; GIESEN, N. V. Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil. **Biology and Fertility of Soils**, [s.l.], v.39, p.296-299, 2004.

- OLDFIELD, T. L.; SIKIRICA, N.; MONDINI, C.; LÓPEZ, G.; KUIKMAN, P. J.; HOLDEN, N. M. Biochar, compost and biochar-compost blend as options to recover nutrients and sequester carbon. **Journal of Environmental Management**, [s.l.], v.218, p.465–476, 2018.
- OUYANG, L.; WANG, F.; TANG, J.; YU, L.; ZHANG, R. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, [s.l.], v. 13, p. 991-1002, 2013.
- SLAVICH, P. G.; SINCLAIR, K.; MORRIS, S. G.; KIMBER, S. W. L.; DOWNIE, A.; VAN ZWIETEN, L. Contrasting effects of manure and green waste biochars on the properties of an acidic ferralsol and productivity of a subtropical pasture. **Plant Soil**, [s.l.], v.366, p.213–227, 2013.
- RIBELATTO, P. J. C.; GENÚ, A. M.; LUSTOSA, S. B. C.; POTT, C. A. Atributos químicos do solo e produção de *Urochloa brizantha* cv. Marandu. **Investigación Agraria**, [s.l.], v.21, n.2, p.108-116, 2019.
- PAZ-FERREIRO, J.; MÉNDEZ, A.; GASCÓ, G. Application of Biochar for Soil Biological Improvement. In: GUO, M.; HE, Z.; UCHIMIYA, S. M. (ed.). *Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers*. Madison: **Soil Science Society of America**, [s.l.], 2016. p. 145-174.
- PEAKE, L. R.; REID, B. J.; TANG, X. Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils. **Geoderma**, [s.l.], v.235–236, p.182–190, 2014.
- VALARINI, P. J.; CURAQUEO, G.; SEGUEL, A.; MANZANO, K.; RUBIO, R.; CORNEJO, P.; BORIE, F.. Effect of compost application on some properties of a volcanic soil from central south Chile. **Chilean Journal of Agricultural Research**, [s.l.], v.69, n.3, p.416-425, 2009.
- PESSENDA, L. C. R.; GOUVEIA, S. E. M.; ARAVAENA, R.; BOULET, R.; VALENCIA, E. P. E. Holocene fire and vegetation changes in southeastern Brazil as deduced from fossil biochar and soil carbon isotopes. **Quaternary International**, [s.l.], v.114, n.1, p.35-43, 2004.
- PETTER, A. (2010) **Biomassa carbonizada como condicionador de solo: aspectos agrônômicos e ambientais do seu uso em solos de cerrado**. Goiânia, 130 p. Tese (Doctoral Thesis) - Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás.
- PETTER, F. A.; MADARI, B. E.; SILVA, M. A. S.; CARNEIRO, M. A. C.; CARVALHO, M. T. M.; MARIMON JÚNIOR, B. H.; PACHECO, L. P. Soil fertility and upland rice yield after biochar application in the Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v.47, n.5, p.699-706, 2012.
- PETTER, F. A.; MADARI, B. E. Biochar: Agronomic and environmental potential in Brazilian savannah soils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v.16, n.7, p.761-768, 2012.
- PETTER, F. A. **Biomassa carbonizada como condicionador de solo: aspectos agrônômicos e ambientais do seu uso em solos de cerrado**. Goiânia, 2010. 130 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás.

- PETTER, F. A.; ANDRADE, F. R.; MARIMON JUNIOR, B. H.; GONÇALVES, L. G.; SCHOSSLER, T. R. Biochar como condicionador de substrato para a produção de mudas de eucalipto. **Revista Caatinga**, [s.l.], v.25, n.4, p.44-51, 2012a.
- PETTER, F. A.; MADARI, B. E.; SILVA, M. A. S.; CARNEIRO, M. A. C.; CARVALHO, M. T. M.; MARIMON JÚNIOR, B. H.; PACHECO, L. P. Soil fertility and upland rice yield after biochar application in the Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v.47, n.5, p.699-706, 2012b.
- PIETIKAINEN, J.; KIIKKILA, O.; FRITZE, H. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying húmus. **Oikos**, [s.l.], v.89, p.231-242, 2000.
- PIMENTA, A. S.; SANTANA, J. A. S.; ANJOS, R. M.; BENITES, V. M.; ARAÚJO, S. O. Caracterização de ácidos húmicos produzidos a partir de carvão vegetal de duas espécies florestais do semi-árido: jurema preta (*mimosa tenuiflora*) e pereiro (*aspidosperma pyrifolium*). **Revista Verde**, v.4, n.4, p.01-11, 2009.
- TKACZYK, P.; MOCEK-PLÓCINIĄK, A.; SKOWROŃSKA, M.; BEDNAREK, W.; KUŚMIERZ, S.; ZAWIERUCHA, E. The mineral fertilizer-dependent chemical parameters of soil acidification under field conditions. **Sustainability**, [s.l.], v.12, 2020.
- RAFAEL, R. B. A.; FERNÁNDEZ-MARCOS, M. L.; COCCO, S.; RUELLO, M. L.; FORNASIER, F.; CORTI, G. Benefits of Biochars and NPK Fertilizers for Soil Quality and Growth of Cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) in an Acid Arenosol. **Pedosphere**, [s.l.], v.29, n.3, p.311-333, 2019.
- NEVES, R. G.; FREITAS, G. S.; DEMINICIS, B. B.; MENDONÇA, E. DE SÁ.; PEÇANHA, A. L.; DOBBSS, L. B.; CHAMBELA NETO, A.; DEMINICIS, R. G. DA S. Dry matter yield, growth index, chemical composition and digestibility of Marandu grass under nitrogen and organic fertilization. **Semina: Ciências Agrárias**, [s.l.], v.40, n.5, p.1901-1912, 2019.
- RIBEIRO-OLIVEIRA, J. P.; SANTANA, D. G.; PEREIRA, V. J.; SANTOS, C. M. Data transformation: an underestimated tool by inappropriate use. **Acta Scientiarum Agronomy**, [s.l.], v.40, 2018.
- DOMINGUES, R. R.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A.; SPOKAS, K. A.; MELO, L. C. A.; TRUGILHO, P. F.; VALENCIANO, M. N.; SILVA, C. A. Enhancing Cation Exchange Capacity of Weathered Soils Using Biochar: FEEDSTOCK, Pyrolysis Conditions and Addition Rate. **Agronomy**, [s.l.], v.10, n.824, 2020.
- ROGOVSKA, N.; LAIRD, D.; CRUSE, R.; FLEMING, P.; PARKIN, T.; MEEK, D. Impact of biochar on manure carbon stabilization and greenhouse gas emissions. **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.], v.75, p.871–879, 2011.
- RADIN, R.; BAKAR, R. A.; ISHAK, C. F.; AHMAD, S. H.; TSONG, L. C. Biochar-compost mixture as amendment for improvement of polybag-growing media and oil palm seedlings at main nursery stage. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, [s.l.], v.7, p.11–23, 2018.

SANTANA, S. S.; BRITO, L. F.; AZENHA, M. V.; OLIVEIRA, A. A.; MALHEIROS, E. B.; RUGGIERI, A. C.; REIS, R. A. Canopy characteristics and tillering dynamics of Marandu palisade grass pastures in the rainy-dry transition season. **Grass and Forage Science**, [s.l.], v.72, n.2, p.261-270, 2016.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Brazilian Soil Classification System**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018.

HALE, S. E.; NURIDA, N. L.; 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**, [s.l.], v.719, 2020.

SCHMIDT, H. P.; PANDIT, B. H.; MARTINSEN, V.; CORNELISSEN, G.; CONTE, P.; KAMMANN, C. I. Fourfold increase in pumpkin yield in response to low dosage root zone application of urine-enhanced biochar to a fertile tropical soil. **Agriculture**, [s.l.], v.5, p.723–741, 2015.

SCHMIDT, H.-P.; KAMMANN, C.; NIGGLI, C.; EVANGELOU, M. W. H.; MACKIE, K. A.; ABIVEN, S. Biochar and biochar-compost as soil amendments to a vineyard soil: Influences on plant growth, nutrient uptake, plant health and grape quality. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s.l.], v.191, p.117–123, 2014.

SCHULZ, H., GLASER, B. Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, [s.l.], v.175, n.3, p.410-422, 2012.

SCHULZ, H.; DUNST, G.; GLASER, B. Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility. **Agronomy for Sustainable Development**, [s.l.], v.33, p.817-827, 2013.

SCHULZ, H.; GLASER, B. Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, [s.l.], v.175, p.410-422, 2012.

SHI, R. Y.; HONG, Z.N.; LI, J. Y.; JIANG, J.; BAQUY, M. A.; XU, R. K.; QIAN, W. Mechanisms for increasing the pH buffering capacity of an acidic ultisol by crop residue-derived biochars. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s.l.], v.65, n.37, p.8111-8119, 2017.

SILBER, A.; LEVKOVITCH, I.; GRABER, R.E., pH-Dependent mineral release and surface properties of cornstraw biochar: Agronomic implications, **Environmental Sciences Technologies**, [s.l.], v.44, p. 9318-9323, 2010.

SILVA, I. C. B.; FERNANDES, L. A.; COLEN, F.; SAMPAIO, R. A. Crescimento e produção de feijoeiro adubado com biocarvão. **Ciência Rural**, [s.l.], v.47, n.11, p.1-8, 2017.

SILVA, M. A. S.; MADARI, B. E.; CARVALHO, M. T. M.; BERNARDES, T. G.; SOUZA, R. O.; OLIVEIRA, F. B. **Efeito da aplicação de biochar sobre propriedades químicas do solo e produtividade de feijoeiro comum irrigado.** In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO, 10, 2011, Goiânia. Anais... Goiânia: Embrapa Arroz e Feijão, 2011. 1 CD-ROM.

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

SLAVICH, P. G.; SINCLAIR, K.; MORRIS, S. G.; KIMBER, S. W. L.; DOWNIE, A.; VAN ZWIETEN, L. Contrasting effects of manure and green waste biochars on the properties of an acidic ferralsol and productivity of a subtropical pasture, **Plant and Soil**, [s.l.], v.366, n.1-2, p.213-227, 2013.

SOHI S.P.; KRULL E.; LOPEZ-CAPEL, E.; BOL, R. **A review of biochar and its use and function in soil.** In: Sparks DL (ed) *Advances in agronomy*, 105. Academic, Burlington, pp 47–82, 2010.

SOHI, S. P; KRULL, E.; LOPEZ-CAPEL, E.; BOL, R. **A review of biochar and its use and function in soil.** In: SPARKS, D.L. (ed.). *Advances In Agronomy*, 105. San Diego: Academic Press, 2010, p.47-82.

SOUZA, B. M. L.; VILELA, H. H.; SANTOS, M. E. R.; RODRIGUES, C. S.; SANTOS, A.L.; NASCIMENTO JUNIOR, D.; ASSIS, C. Z.; ROCHA, G. O. Characterization of tillers in deferred Piata palisade grass with eight e initial eight and nitrogen levels. **Revista Brasileira de Zootecnia**. [s.l.], v.41, p.1618-1624, 2012.

LIMA, S. L.; TAMIOZZO, S.; PALOMINO, E. C.; PETTER, F. A.; MARIMON-JUNIOR, B. H. Interactions of biochar and organic compound for seedlings production of *Magonia pubescens* A. St.-Hil. **Revista Árvore**, [s.l.], v.39, n.4, p.655-661, 2015.

STEINER, C.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; NEHLS, T.; DE MACÊDO, J. L. V.; BLUM, W. E. H.; ZECH, W. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. **Plant and Soil**, [s.l.], v.291, n.1-2, p.275-290, 2007.

STREUBEL, J. D.; COLLINS, H. P.; GARCIA-PEREZ, M.; TARARA, J.; GRANATSTEIN, D.; KRUGER, C. E. **Influence of contrasting biochar types on five soils at increasing rates of application.** *Soil Science Society of America Journal*, [s.l.], v.75, n.4, p.1402-1413, 2011.

TANG, J.; ZHU; W.; KOOKANA, R.; KATAYAMA, A. Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, [s.l.], v.116, n.6, p.653-659, 2013.

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

- TEIXEIRA, R. N. V.; PEREIRA, C. E.; KIKUTI, H.; DEMINICIS, B. B. *Brachiaria brizantha* (Syn. *Uroclhoa brizantha*) cv. Marandu sob diferentes doses de nitrogênio e fósforo em Humaitá-AM, Brazil. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, [s.l.], v.11, n.2, p.35-41, 2018.
- THOMAS, S. C.; FRYE, S.; GALE, N.; GARMON, M.; LAUNCHBURY, R.; MACHADO N.; MELAMED, S.; MURRAY, J.; PETROFF, A.; WINSBOROUGH, C. Biochar mitigates negative effects of salt additions on two herbaceous plant species. **Journal of Environmental Management**, [s.l.], v.29, p.62-68, 2013.
- TROMPOWSKY, P. M.; BENITES, V. DE M.; MADARI, B. E.; PIMENTA, A. S.; HOCKADAY, W. C.; HATCHER, P. G. Characterization of humic like substances obtained by chemical oxidation of eucalyptus charcoal. **Organic Geochemistry**, [s.l.], v.36, n.11, p.1480-1489, 2005.
- TROY, S. H.; LAWLOR, P. G.; O' FLYNN, C. J.; HEALY, M. G. Impact of biochar addition to soil on greenhouse gas emissions following pig manure application. **Soil Biology and Biochemistry**, [s.l.], v.60, p.173-181, 2013.
- UZOMA, K. C.; INOUE, M.; ANDRY, H.; FUJIMAKI, H.; ZAHOOR, A.; NISHIHARA, E. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. **Soil Use and Management**, [s.l.], v.27, p.205–212, 2011.
- VALÉRIA P. B. EUCLIDES, DENISE B. MONTAGNER, MANUEL CLÁUDIO M. MACEDO, ALEXANDRE R. DE ARAÚJO; GELSON S. DIFANTE; RODRIGO A. BARBOSA. Grazing intensity affects forage accumulation and persistence of Marandu palisade grass in the Brazilian savannah. **Grass and Forage Science**. p.1-13, 2019.
- VAN ZWIETEN, L. et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. **Plant Soil**, [s.l.], v.327, p.235-246, 2010.
- VANDECASTEELE, B.; SINICCO, T.; D'HOSE, T.; VANDEN NEST, T.; MONDINI, C. **Biochar amendment before or after composting affects compost quality and N losses, but not P plant uptake**. **Journal of Environmental Management**, [s.l.], v.168, p.200–209, 2016.
- VERHEIJEN, F. G. A.; JEFFERY, S.; BASTOS, A. C.; VAN DER VELDE, M.; DIAFAS, I. **Biochar application to soils - a critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions**. EUR 24099 EN, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 149pp. 2010.
- WIDOWATI; ASNAH. Biochar Can Enhance Potassium Fertilization Efficiency and Economic Feasibility of Maize Cultivation. **Journal of Agricultural Science**, [s.l.], v.6, n.2; p.24-32, 2014.
- WIEDNER, K.; FISCHER, D.; WALTHER, S.; CRISCUOLI, I.; FAVILLI, F.; NELLE, O.; GLASER, B. Acceleration of biochar surface oxidation during composting? **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s.l.], v.63, n.15, p.3830-3837, 2015.
- WILDMAN, J.; DERBYSHIRE, F. Origins and functions of microporosity in activated carbons from biochar and wood precursors. **Fuel**, [s.l.], v.70, n.5, p.655-661, 1991.

LUO, X.; LIU, G.; XIA, Y.; CHEN, L.; JIANG, Z.; ZHENG, H.; WANG, Z. Use of biochar-compost to improve properties and productivity of the degraded coastal soil in the Yellow River Delta, China. **Journal of Soils and Sediments**, [s.l.], v.17, p.780-789, 2017.

YANAI, Y.; TOYTOTA, K.; OKAZAKI, M. Effects of biochar addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments. **Soil Science and Plant Nutrition**, [s.l.], v.53, n.2, p.181-188, 2007.

YUE, Y.; CUI, L.; LIN, Q.; LI, G.; ZHAO, X. Efficiency of sewage sludge biochar in improving urban soil properties and promoting grass growth. **Chemosphere**, [s.l.], v.173, p.551-556, 2017.

ZHANG, J; CHEN, G.; SUN, H.; ZHOU, S.; ZOU, G. Straw biochar hastens organic matter degradation and produces nutrient-rich compost. **Bioresour Technol.** [s.l.], v.200, n.8, p.76-83 2016.

ZINATI, G. M.; LI, Y. C.; BRYAN, H. H. Utilization of compost increases organic carbon and its humin, humic and fulvic acid fractions in calcareous soil. **Compost Science & Utilization**, [s.l.], v.9, p.156-162, 2001.