



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

OTÁVIO LÁZARO REZENDE

**EFEITO DE DOSES DE BIOCHAR NA TENSÃO DE ÁGUA E NA UMIDADE
GRAVIMÉTRICA DE UM LATOSSOLO**

Brasília
2023

OTÁVIO LÁZARO REZENDE

**EFEITO DE DOSES DE BIOCHAR NA TENSÃO DE ÁGUA E NA UMIDADE
GRAVIMÉTRICA DE UM LATOSSOLO**

Monografia apresentada à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília como parte das exigências do curso de Bacharelado em Agronomia para a obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Delvio Sandri

BRASÍLIA

2023

OTÁVIO LÁZARO REZENDE

**EFEITO DE DOSES DE BIOCHAR NA TENSÃO E UMIDADE DE UM
LATOSSOLO**

Monografia apresentada à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília como parte das exigências do curso de Bacharelado em Agronomia para a obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Delvio Sandri

BANCA EXAMINADORA

Prof. Delvio Sandri
Doutor, FAV/Universidade de Brasília

Profa. Jordana Moura Caetano
Doutora, FAV/Universidade de Brasília

Prof. Cícero Célio de Figueiredo
Doutor, FAV/Universidade de Brasília

REZENDE, Otávio Lázaro. **Efeito de doses de biochar na tensão de água e na umidade gravimétrica de um latossolo**. Monografia (Graduação em Agronomia) - Universidade de Brasília, 2023.

RESUMO

O biochar é um material produzido a partir da pirólise de materiais orgânicos, apresenta características interessantes para o uso no meio agrícola devido ao seu conteúdo em nutrientes e carbono resistente à decomposição. Tais características lhe conferem propriedades interessantes para a fertilidade e estruturação do solo, apresentando influência na tensão e na capacidade de retenção de água. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de diferentes doses de biochar de lodo de esgoto (BLE) (0%, 3%, 6%, 9% e 12%), incorporadas em amostras de Latossolo Vermelho-Amarelo, em três repetições (vasos), sobre a tensão de água no solo medida com tensiômetro e umidade monitorada pelo método de pesagem. O experimento foi conduzido em vasos, em ambiente protegido. As medidas foram realizadas durante um ciclo de secagem do solo, iniciando com o solo próximo a saturação até o início da escorva dos tensiômetros. A análise estatística foi feita por meio do Teste de Tukey a 5%. Não foram obtidas diferenças significativas na relação entre umidade e tensão para todos os tratamentos. A partir do oitavo dia do início do processo de secagem do solo, a tensão de água do solo nas doses de 9% e 12% de BLE foi significativamente menor que as doses de 0% e 3% de BLE, mesmo não havendo diferença significativa na umidade. Desse modo foi possível concluir que para a faixa entre 0 e 100 kPa, com a adição de BLE não foram observados ganhos na capacidade de retenção de água que possa impactar no manejo de irrigação.

Palavras-chave: déficit hídrico, umidade do solo, tensiômetro, tensão de água no solo.

ABSTRACT

Biochar is a material produced from the pyrolysis of organic materials, it has interesting characteristics for use in agriculture due to its nutrient and carbon content that is resistant to decomposition. These characteristics give it interesting properties for soil fertility and structuring, influencing tension and water retention capacity. Thus, the objective of this work was to evaluate the influence of different doses of sewage sludge biochar (BLE) (0%, 3%, 6%, 9% and 12%), incorporated into Red-Yellow Oxisol samples, in three repetitions (pots), on the water tension in the soil measured with a tensiometer and humidity monitored by the weighing method. The experiment was conducted in pots, in a protected environment. The measurements were carried out during a soil drying cycle, starting with the soil close to saturation until the beginning of the tensiometers priming. Statistical analysis was performed using the 5% Tukey Test. No significant differences were obtained in the relationship between humidity and tension for all treatments. From the eighth day of the beginning of the soil drying process, soil water tension in doses of 9% and 12% of BLE was significantly lower than doses of 0% and 3% of BLE, even though there was no significant difference in humidity. In this way, it was possible to conclude that for the range between 0 and 100 kPa, with the addition of BLE, no gains in water retention capacity were observed that could impact irrigation management.

Keywords: water deficit, soil moisture, tensiometer, soil water tension.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	7
LISTA DE FIGURAS.....	8
1. INTRODUÇÃO.....	9
2. OBJETIVO.....	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1 Características físico-hídricas do solo.....	12
3.1.1. Solo como um reservatório de água.....	12
3.1.2 Tensão de água no solo.....	12
3.1.3 Tensiometria.....	14
3.2. Biochar.....	15
3.2.1. Origem, produção e caracterização.....	15
3.2.2. Influência do biochar nas características físico-hídricas do solo.....	17
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
4.1 Local do experimento.....	19
4.2 Vaso de cultivo.....	19
4.3 Instalação dos tensiômetros nos vasos.....	19
4.2 Caracterização do biochar.....	20
4.3 Caracterização do solo utilizado.....	21
4.4 Dose de biochar avaliadas (tratamentos).....	22
4.5 Condução do experimento.....	22
4.5 Tratamento e análise dos dados.....	23
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
5.1. Efeitos do biochar na umidade e tensão do solo ao longo dos dias.....	24
5.2. Relação umidade x tensão para as doses de BLE.....	28
6. CONCLUSÕES.....	31
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades físico-químicas do biochar utilizado.....	20
Tabela 2. Tensões para os dias 3, 6, 7, 8 e 9 após o início do processo de secagem do solo.....	26
Tabela 3. Tensão dos tensiômetros de cada tratamento nos dias 3, 6 e 9 após o início do processo de secagem do solo.....	27
Tabela 4. Umidade para tensões de 20, 40, 60 e 80 kPa em função das doses de biochar.....	29

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Dimensões do vaso utilizado no experimento.....	19
Figura 2. Disposição das unidades experimentais com o solo seco antes da instalação dos tensiômetros (a) e com os tensiômetros instalados (b) e tensiômetro (c)	20
Figura 3. Curva de retenção com valores de umidade volumétrica em função do potencial matricial do Latossolo Vermelho Amarelo, segundo o modelo de van Genuchten para o ψ : potencial matricial da água no solo (kPa).....	21
Figura 4. Tensímetro digital de punção (a), restabelecimento da água no tensiômetro utilizando uma seringa (b), pesagem dos vasos (c).....	23
Figura 5. Variação da tensão (a) e umidade (b) ao longo dos dias e horários em função das doses de BLE.....	24
Figura 6. Curvas de relação tensão x umidade do solo para cada dose de BLE....	28

1. INTRODUÇÃO

Diante das mudanças na dinâmica de produção de alimentos que ocorreram ao longo dos últimos anos, há uma preocupação dos agentes envolvidos na produção em desenvolver tecnologias para aumentar a produtividade e rentabilidade de áreas agrícolas sem comprometer o meio ambiente (VILELA, 2022). Tais mudanças envolvem o aumento da eficiência dos processos e técnicas de manejo, entre esses a irrigação. Dados do Brasil (2023) indicam que a irrigação é a atividade que mais consome água no Brasil, responsável por 46% das retiradas nos corpos hídricos superficiais e subterrâneos. Dessa maneira a ciência pode contribuir para o aperfeiçoamento dos métodos de irrigação ou na busca por condicionadores de solo que aumentem a capacidade de retenção de água.

Nesse contexto, o biochar, material proveniente do processamento térmico de biomassa oriunda de várias matérias-primas, inclusive de reuso, é uma possível alternativa para uso em áreas agrícolas, pois suas características físicas podem alterar os aspectos de densidade e porosidade do solo, importantes fatores na dinâmica da água (LIMA et al., 2020).

Por ter densidade de partículas menor que a dos minerais do solo, a adição de biochar confere menor densidade ao solo, também há alteração da porosidade do solo com sua adição, tal efeito pode ser explicado pela formação de poros maiores ao redor das partículas de biochar, esse aumento de poros pode contribuir no aumento da capacidade de retenção de água no solo e variam conforme as diferentes matérias-primas ou processos de produção (GALVÃO, 2023), contudo, ainda são necessários estudos para melhor entender o efeito do uso desse material incorporado no solo sobre a umidade do solo em função das doses aplicadas.

Os solos submetidos a sistemas intensivos de produção tendem a apresentar camadas de compactação que reduzem a infiltração e conseqüentemente o armazenamento de água no subsolo. Sistemas com aporte e conservação da matéria orgânica no solo podem diminuir essa problemática, entretanto, os solos de regiões tropicais tendem a degradar rapidamente a matéria orgânica (MELO, 2020). Desse modo, o biochar é uma alternativa, pois apresenta grande longevidade no solo podendo favorecer o sequestro de carbono, além de ser uma ferramenta sustentável de incremento de nutrientes no sistema (REZENDE et al., 2011).

A quantidade de água presente em um determinado volume de solo é expressa como sua umidade, e a energia com que a água é retida às partículas é

denominada tensão, ambas estão relacionadas e são inversas, ou seja, conforme a umidade do solo diminui a tensão aumenta, sendo assim, a tensão indica indiretamente qual a umidade do solo. Conhecer esses valores e como os materiais adicionados ao solo os afetam é importante no planejamento do manejo de irrigação e mitigação de problemas relacionados à restrição hídrica (PIMENTEL, 2021).

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a interferência de diferentes doses de biochar de lodo de esgoto (BLE) na tensão de água no solo medida diretamente e na umidade do solo obtida diretamente.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Características físico-hídricas do solo

3.1.1. Solo como um reservatório de água

O solo é um meio complexo formado por uma fração sólida, originada de diferentes processos de pedogênese, denominada matriz do solo, por fração líquida, chamada de solução do solo, e fração gasosa (BERNARDO et al., 2008).

As partículas sólidas do solo possuem granulometria diferentes e se agregam e arranjam formando espaços entre suas partículas, os poros, que serão ocupados pela fração gasosa ou líquida. Os poros são divididos, com base em seu tamanho, em macroporos e microporos, não há um critério numérico e unânime estabelecido que demonstre exatamente tal divisão, porém considera-se que os macroporos são aqueles em que a força de ascensão capilar é desprezível, sendo importantes na aeração e escoamento rápido de água no perfil do solo e os microporos são aqueles em que há maior força de ascensão capilar (BRADY & WEIL, 2013). van Lier (2020) considera que microporos são aqueles com raio menor que 25 micrômetros.

Sendo uma estrutura dinâmica, a porcentagem de um determinado volume que será ocupado pela fração sólida pode variar em função da agregação das partículas do solo, sua compactação e textura. A porcentagem das frações líquida e gasosa variam em função do conteúdo de água do solo. Os gases ocupam todos os espaços que não estão ocupados pela solução do solo, quando água ocupa totalmente os espaços porosos se diz que o solo está saturado (LEÃO, 2022).

No ciclo hídrico do ambiente, o solo funciona como um reservatório dinâmico de água devido às suas várias características físico-hídricas. A relação de volume ou massa de solo e a água contida nele é chamada umidade do solo.

3.1.2 Tensão de água no solo

A velocidade e o sentido do movimento da água são regidos pelas diferenças nos níveis de energia entre pontos no solo. Assim como outras substâncias, a água se move de regiões com maior energia para regiões com menor energia

acompanhando um gradiente de potencial. O deslocamento da água no solo é muito lento de modo que a energia cinética é insignificante, sendo, portanto, considerada somente a energia potencial, que se dá em função da posição da partícula de água e sua interação com o solo (VAN LIER, 2020).

A energia potencial total de água no solo é composta pela somatória de algumas forças, sendo que as mais expressivas em solos não saturados são:

- Potencial gravitacional: Em solos com umidades próximas a saturação, a água está presente em sua maioria nos macroporos, tendo pouca interação com a superfície das partículas sólidas, em vista disso essa água pode percolar no perfil do solo regida pela força gravitacional sendo chamada de água livre.
- Potencial mátrico: É referente a ação que as forças mátricas exercem na água do solo, tais forças representam a atração entre a água e as partículas sólidas do solo, conforme a umidade do solo diminui, a força que a água é atraída pelas partículas sólidas aumenta, portanto, essa força é mais importante em solos não saturados nos quais a água está majoritariamente presente nos microporos (VAN LIER, 2020; BEZERRA et al., 2012).
- Potencial osmótico: É referente à concentração de solutos na solução do solo, o que pode gerar um gradiente de potencial osmótico que ocasiona um movimento da água em direção à região de maior concentração, esse potencial é especialmente importante sobretudo em solos com tendência à salinização em que pode interferir na absorção de água pelas plantas, porém em casos de baixa condutividade elétrica no solo ele pode ser desprezado (VAN LIER, 2020).

Não há como determinar o momento exato em que uma das forças se torna responsável pela maior parte do potencial, pois ocorrem simultaneamente no sistema solo-água.

Essas forças mátricas ocorrem em função da adsorção da água à superfície dos agregados por interação eletroquímica, ou por conta da capilaridade que é referente ao movimento de ascensão capilar da água em espaços com diâmetro muito pequeno, de tal forma que quanto menor o raio do poro do solo maior será a força de ascensão capilar. Essa atração entre a água e a matriz do solo pode ser quantificada e é chamada de potencial matricial ou tensão do solo (LEÃO, 2019).

3.1.3 Tensiometria

Existem vários métodos para medir a tensão de água no solo, dentre eles, um dos mais comuns, práticos e baratos é utilizando o tensiômetro. Esse instrumento foi proposto por Gardner e colaboradores em 1922 e parte do princípio do equilíbrio entre a água no solo e a água interna do tensiômetro (LIMA et al., 2021).

É um aparelho formado por uma cápsula cerâmica porosa que fica em contato com o solo ligada a um tubo vedado e cheio de água. Conforme a umidade do solo diminui, a água do tensiômetro é atraída para ele por conta da diferença de potencial, gerando um vácuo na parte superior do tubo, que pode ser medido com um tensímetro digital ou vacuômetro. Uma das desvantagens do tensiômetro é que sua faixa de mensuração vai até aproximadamente 80 kPa, após esse valor os solos em geral já apresentam umidade mais baixa e permitem que o ar passe por seus poros e através da cápsula entre no tensiômetro, desfazendo o vácuo, nesse momento se diz que o tensiômetro perdeu a escorva (COELHO & TEIXEIRA, 2004; BERNARDO, 2008).

Com o tensiômetro também é possível medir indiretamente a umidade do solo, uma vez conhecida sua curva característica de retenção de água, que expressa graficamente como os valores de tensão e umidade do solo se correlacionam. Tal curva é específica para cada solo, pois suas diversas características como textura, teor de matéria orgânica e porosidade afetam as propriedades físico-hídricas.

A partir dessa curva é possível obter valores relativos a algumas quantidades importantes de água no solo, como, por exemplo, a capacidade de campo. Convencionou-se como sendo o valor de umidade correspondente a uma tensão que varia entre 6 e 10 kPa em solos argilosos, esse valor representa teoricamente a umidade no solo após a percolação de toda a água livre que se move regida pelo potencial gravitacional, ou seja, quando o solo está em capacidade de campo o movimento descendente de água é muito reduzido (VAN LIER, 2020).

Do mesmo modo há também o ponto de murcha permanente, que se caracteriza pelo valor de umidade na tensão de 1500 kPa, tensão a partir da qual a planta não consegue retirar água do solo. O conteúdo de água entre esses dois valores é chamado de disponibilidade total de água no solo (ANDRADE & STONE, 2011).

A quantidade de água disponível entre a capacidade de campo e um valor de umidade que varia em função da sensibilidade de cada cultivo é chamado de disponibilidade real de água e se trata da faixa de umidade na qual, desde que mantida, as plantas não apresentam perdas de produtividade devido ao estresse hídrico. O conhecimento desses valores é muito útil no manejo de irrigação, pois conhecendo-os é possível determinar a quantidade necessária de água e turno de rega.

Na irrigação busca-se aplicar lâminas que elevem a umidade do solo até a capacidade de campo, acima desse valor ocorrem perdas de água por percolação e conseqüentemente perda de nutrientes da solução. Quando a umidade no solo se torna menor que a disponibilidade real de água é o momento de irrigar novamente para evitar que a planta tenha prejuízos no seu metabolismo em razão de déficit hídrico (BERNARDO, 2008).

3.2. Biochar

3.2.1. Origem, produção e caracterização

O biochar é um produto sólido obtido através da pirólise de materiais orgânicos. A palavra biochar vem da junção das palavras inglesas biomass charcoal (carvão de biomassa). Esse material se apresenta usualmente na forma granulada com coloração escura e tem características de alta porosidade e superfície específica, elevado teor de carbono orgânico e concentração de minerais advindos da matéria-prima utilizada na sua produção (FARIAS, 2018; LEHMANN & STEPHEN, 2009).

Os solos antrópicos encontrados na Amazônia que possuem alto teor de carbono, em média 150 g kg^{-1} e alta fertilidade (MANGRICH et al., 2011), contrastando com as características de solo comumente encontrados na região, chamados terra preta de índio, indicam os benefícios do carbono estável no solo e associado a isso indicam a possibilidade de uso do biochar na agricultura (REZENDE et al., 2011).

A pirólise é um processo de decomposição termoquímica em condições de ausência ou baixíssimas concentrações de oxigênio sob temperatura e tempo variáveis, em geral entre 300 e 700 °C. Nesse processo o carbono presente na

matéria-prima se conserva no produto final havendo mudanças na sua forma molecular e perda de parte do hidrogênio e oxigênio presentes (LEHMANN & STEPHEN, 2009).

Uma fração do Carbono submetido a tais temperaturas se reorganiza na forma de anéis aromáticos condensados, o que lhe confere estabilidade bioquímica e resistência à decomposição (FOGAÇA, 2019). Wang et al. (2016) demonstraram que o biochar é degradado lentamente sobretudo pela microbiota, apesar de que alguns processos abióticos também podem contribuir, seu tempo de degradação é diferente em função da matéria-prima e condições de pirólise bem como das propriedades do solo.

As características físico-químicas do biochar são diversas de acordo com a matéria-prima utilizada, com a temperatura e tempo de pirólise e com sua granulometria (LORENCETTI, 2022). Há uma grande possibilidade de materiais que podem ser utilizados, por exemplo, biomassa florestal (TRAZZI et al., 2018), serragem, palha de cana-de-açúcar (CONZ, 2015), madeira de eucalipto (MOTA, 2020) e lodo de esgoto (LIMA et al., 2020).

Com o avanço das áreas urbanas, o lodo de esgoto e a água residuária são resíduos cada vez mais produzidos. Seu gerenciamento e disposição final são complexos e onerosos, sendo descartados em aterros sanitários ou muitas vezes diretamente em cursos d'água acarretando em prejuízos ecológicos (PEDROZA et al., 2010).

O lodo de esgoto já é usado na agricultura em algumas localidades e há regulamentações que dispõem sobre a aplicação do lodo de esgoto em áreas agrícolas (BRASIL, 2020). Apesar de seus benefícios como o fornecimento de minerais e matéria orgânica para o solo, existem restrições e contraindicações para seu uso, por exemplo, no cultivo de hortaliças folhosas ou tuberosas ou ainda impedimento à aplicação em determinados locais em função do risco de contaminação microbiológica, sendo assim uma possibilidade de uso do lodo de esgoto é a sua aplicação como matéria-prima para produção de biochar, pois no processo de pirólise os microrganismos são eliminados.

A estrutura molecular estável do biochar permite que sua recalcitrância seja mantida por longos períodos ao passo que a superfície de sua estrutura é repleta de cargas negativas, o que aumenta a capacidade de troca de cátions do solo. Tal fato somado com a solubilização dos minerais que estão presentes em sua composição

promovem o fornecimento de nutrientes necessários para o desenvolvimento das plantas e aumentam a eficiência da adubação.

Essas propriedades demonstram a possibilidade do uso do biochar enquanto produto derivado de resíduos que comprometem o meio ambiente. A estabilidade do carbono no biochar que implica na sua lenta decomposição também demonstra seu potencial para se tornar uma ferramenta no sequestro de carbono, Wang et al. (2016) observou que o biochar derivado de gramínea se degradava em 0,007% dia⁻¹ e o biochar derivado de madeira em 0,004% dia⁻¹. Tais fatos comprovam o potencial sustentável do uso do biochar (REZENDE et al., 2011).

3.2.2. Influência do biochar nas características físico-hídricas do solo

Devido a suas características, o biochar é um material promissor para aplicação na agricultura como fertilizante e condicionador de solo nos sistemas agrícolas. Segundo Tanure (2018), devido à sua alta porosidade total, em torno de 47%, o biochar pode ajudar a diminuir a densidade e compactação do solo.

A energia livre da elevada superfície específica do biochar auxiliam na formação de agregados e estruturação do solo pois suas cargas superficiais podem formar ligações com as argilas e outras formas de matéria orgânica presente no solo (FOGAÇA, 2019).

Pituello et al. (2018) destacaram que as propriedades eletroquímicas do biochar podem alterar a estruturação do solo a depender de sua textura, em solos com maior teor de areia o biochar se liga aos colóides do solo aumentando sua superfície específica e estabilidade de agregados, entretanto em solos com maior teor de argila a energia livre do biochar causa modificações no equilíbrio das cargas nos colóides, o que pode ocasionar na diminuição da agregação do solo. Vale destacar que outros autores como Peng et al. (2011) concluíram que o biochar aumentou a agregação em solos com maior teor de argila, essas divergências podem ocorrer por conta da variabilidade das características do biochar em função de sua matéria-prima e processo de pirólise.

As propriedades do biochar afetam a dinâmica da água no solo diretamente por conta de sua porosidade, ou indiretamente pois pode diminuir a densidade e aumentar a porosidade e agregação do solo, sendo assim, sua adição pode

umentar a capacidade de retenção de água no solo e velocidade de infiltração (BATISTA et al., 2018; GALVÃO, 2023).

Desse modo, o biochar pode proporcionar um solo com ambiente mais favorável ao desenvolvimento radicular, por fornecer carbono orgânico ao solo e favorecer a oxigenação. Também favorece o desenvolvimento da microbiota do solo. Sendo assim, o biochar age como um indutor direto e indireto da melhoria da qualidade do solo, pois ajuda a promover o crescimento adequado da biomassa vegetal ,que, por si só, auxiliará na fixação de carbono orgânico e aumento da matéria orgânica no solo, tanto superficialmente quanto em profundidade por conta do crescimento radicular. Tais processos naturalmente favorecem a estruturação do solo e a eficiência do uso da água e nutrientes pelas plantas, pois as raízes exploram maior volume de solo (MOTA, 2020).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local do experimento

O experimento foi conduzido em ambiente protegido, sem sistema de arrefecimento, na Estação Experimental de Biologia da Universidade de Brasília (latitude 15°44'S, longitude 47°53'W e altitude 1000 metros). O período do experimento foi de 02/11/2023 a 13/11/2023, 11 dias.

4.2 Vaso de cultivo

A unidade experimental consistiu em um vaso plástico de volume total de 5 L, com dimensões conforme Figura 1. Na base interna do vaso foi instalada uma manta geotêxtil para evitar a perda de solo.



Figura 1. Dimensões do vaso utilizado no experimento.

4.3 Instalação dos tensiômetros nos vasos

Em cada vaso foram instalados 2 tensiômetros a 10 cm de profundidade, de modo que o centro da altura da cápsula estivesse no centro da altura do vaso (Figura 2b). Todos os vasos e tensiômetros cheios de água foram pesados e numerados individualmente em balança analítica com precisão de 5 g, para que tais valores pudessem ser descontados no cálculo do peso de água por vaso.

O tubo de acrílico do tensiômetro possui 10 cm de comprimento, 12 mm de diâmetro externo e 10 mm de diâmetro interno. A cápsula porosa possui encaixe de ½” para tubo de PVC branco, fabricação nacional. O tubo de PVC branco tem 30 cm de comprimento.

Em cada tensiômetro foi adicionado água a 2 cm antes da borda superior do tubo de acrílico do tensiômetro, já com a cápsula previamente saturada por 24 h.



Figura 2. Disposição das unidades experimentais com o solo seco antes da instalação dos tensiômetros (a) e com os tensiômetros instalados (b) e tensiômetro (c).

4.2 Caracterização do biochar

O biochar utilizado foi obtido a partir de lodo de esgoto coletado na estação de tratamento de esgoto de Samambaia, pertencente à Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB). O processo de produção foi feito na Universidade de Brasília com temperatura de pirólise de 300 °C durante 5 h, o rendimento foi em torno de 80% e densidade de 0,67 g cm⁻³. O biochar foi classificado pelo tamanho médio dos grânulos menores que 4 mm e foi realizada a análise de sua composição e características (Tabela 1).

Tabela 1. Propriedades físico-químicas do biochar utilizado

Propriedades	Biochar
Sólidos Voláteis (%)	41,75 ± 2,47

Cinzas (%)	48,27 ± 1,08
Carbono Fixo (%)	5,72 ± 1,55
Carbono Inerte (%)	2,86 ± 0,34
Carbono Total (%)	19,92 ± 0,28
COT (%)	18,61 ± 0,09
MOT (%)	32,09 ± 0,15
Rendimento (%)	81,21 ± 3,30

COT: carbono orgânico total; MOT: matéria orgânica total

4.3 Caracterização do solo utilizado

O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho-Amarelo (EMBRAPA, 2018) com densidade de 0,98 g cm⁻³. A sua curva de retenção de água no solo está representada na Figura 3.

A curva de retenção de água no solo (CRAS) (Figura 3) foi confeccionada a partir de 5 amostras indeformadas coletadas no centro do raio das embalagens de cultivo. A CRAS foi realizada com extrator de Richards (1965), com a restrição de Mualem nos potenciais matriciais de -300, -80, -50, -33, -10, -8, -6, -5 e -2 kPa.

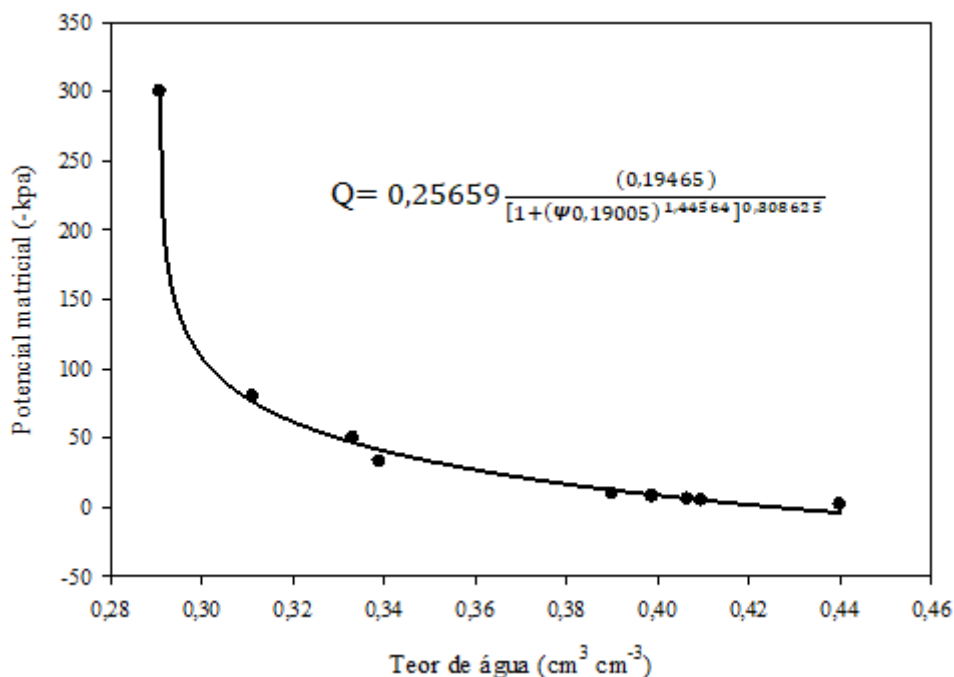


Figura 3. Curva de retenção com valores de umidade volumétrica em função do potencial matricial do Latossolo Vermelho Amarelo, segundo o modelo de van Genuchten para o ψ : potencial matricial da água no solo (kPa).

4.4 Dose de biochar avaliadas (tratamentos)

O experimento foi realizado com 5 tratamentos e 3 repetições (Figura 2b), com unidades experimentais afastadas de 10 cm uma da outra. As doses de biochar de lodo de esgoto (BLE) foram de 0%, 3%, 6%, 9% e 12% em base de volume, correspondentes a 0 t/ha, 40 t/ha, 80 t/ha, 120 t/ha e 160 t/ha, respectivamente, porém para que fosse garantida a precisão das proporções da mistura de solo e do BLE em todas as doses, a quantidade de ambos foi definida com base no peso, observando as densidades do solo e do BLE.

4.5 Condução do experimento

Após o enchimento dos vasos, adicionou-se dois litros de água em cada vaso para umedecimento até a saturação. Após a percolação do excesso de água procedeu-se a instalação dos tensiômetros cheios de água até o nível pré-estabelecido, escorvando-os para dar início ao processo de leitura das tensões.

As medidas de tensão foram feitas utilizando um tensímetro digital de punção com precisão de 0,01 kPa (Figura 4a) e os vasos foram pesados em uma balança digital com precisão de 5 g (Figura 4c). As medidas de tensão e pesos foram realizadas nos horários de 7:00, 12:00 e 17:00h durante 11 dias, até o limite de leitura do tensímetro utilizado, que é 100 kPa.

Sempre após a leitura da tensão, foi restabelecida a água no interior dos tensiômetros até 2 cm abaixo da borda superior do tubo de acrílico, utilizando uma seringa e agulha de punção, o nível de água do tensiômetro precisou ser restabelecido para que o peso da água interna a ele fosse o mesmo pesado inicialmente e não influenciasse nos cálculos de umidade.

Em seguida foi inserida uma agulha através da rolha de silicone para que o tensiômetro retornasse à condição de pressão atmosférica (Figura 4b). Por fim, cada vaso foi pesado, objetivando a determinação do peso da água presente no solo.



Figura 4. Tensímetro digital de punção (a), restabelecimento da água no tensiômetro utilizando uma seringa (b), pesagem do vaso (c).

4.5 Tratamento e análise dos dados

Foi obtida a média simples dos dois tensiômetros de cada vaso nas três repetições de cada tratamento (doses de biochar), tanto da tensão de água no solo como da umidade base peso, esta última obtida para cada momento por:

$$U_{bp} = (P_{reg} - P_{in})/V_{solo}$$

em que:

U_{bp} = Umidade em base peso;

P_{reg} = Peso registrado da unidade total;

P_{in} = Peso inicial (unidade experimental antes de se adicionar água)

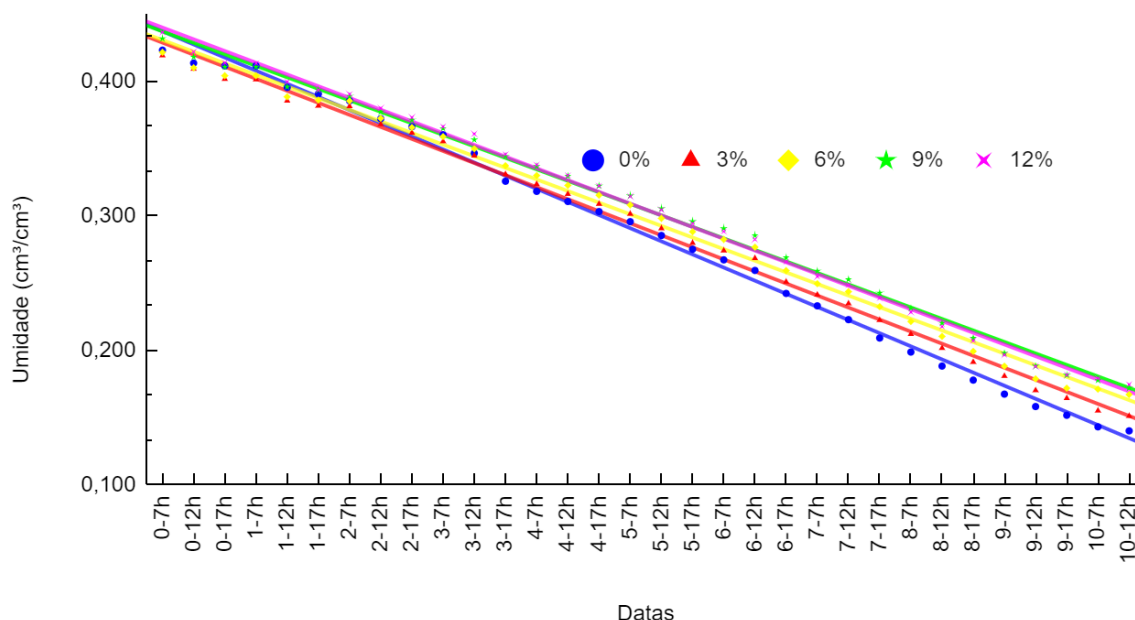
V_{solo} = volume de solo no vaso.

As análises de variância foram feitas utilizando Teste de Tukey a 5% de significância com o auxílio do software Sisvar (Ferreira, 2011). As equações de regressão foram obtidas no Microsoft Excel.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Efeitos do biochar na umidade e tensão do solo ao longo dos dias

A umidade do solo variou de um dia para outro de maneira constante, reduzindo, em média $0,025 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ao dia, não havendo diferença significativa da umidade do solo entre as doses de biochar (Figura 5a). Por outro lado a tensão aumenta com o passar dos dias, de modo que conforme o solo seca, as variações de tensão ficam mais sensíveis às variações de umidade (Figura 5b). Tal fato é explicado pela força com que a água fica retida no solo, de modo que nos primeiros dias com umidade maior, a água presente nos macroporos é retida com menos força pelas partículas do solo, portanto a tensão é baixa. Já, sob menores umidades, a água apresenta maior interação eletroquímica com a estrutura nos microporos, logo a tensão é alta (VAN LIER, 2020). Até o quarto dia, independente da dose de biochar, a tensão se manteve praticamente estável, havendo alteração a partir desse dia, com tensões maiores para as menores doses de BLE.



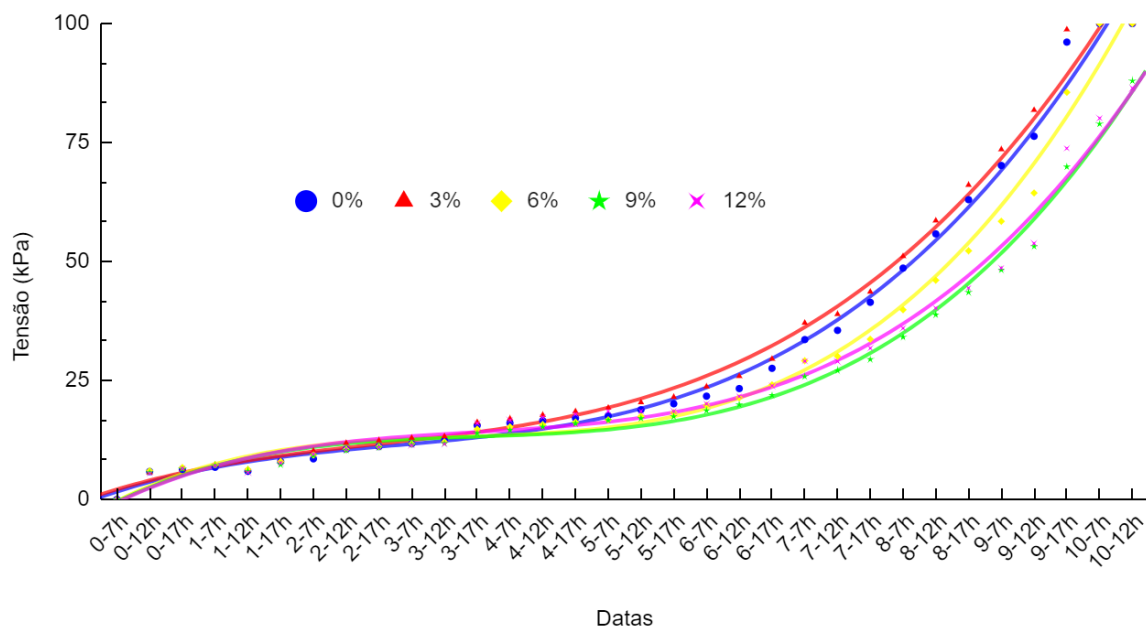


Figura 5. Variação da umidade (a) e tensão (b) ao longo dos dias e horários em função das doses de BLE.

Com a secagem do solo, os valores de tensão passaram a variar significativamente entre os tratamentos a partir do oitavo dia (Tabela 2). Nesse dia, os tratamentos com 9% e 12% de BLE apresentaram as menores tensões, 38,8 e 40,2 kPa, respectivamente, para o mesmo tempo de secagem e sob mesmas condições que os demais tratamentos, se diferenciando significativamente de 0% e 3% de BLE, que apresentaram tensões de 55,8 e 58,6 kPa, respectivamente, mesmo que a umidade não tenha apresentado variações significativas. Em 6% de BLE a tensão foi de 46,1 kPa e não se diferenciou de nenhuma das demais doses.

No terceiro, sexto e sétimo dia (Tabela 2), as tensões nas doses de 6%, 9% e 12% de BLE sempre foram menores em relação a 0% de BLE, mesmo sem haver diferença significativa. A variação de tensão entre 9% e 12% em relação a 0% aumentou ao longo dos dias, sendo que no oitavo dia para as doses 9% e 12% de BLE foram menores em 30,6% e 28,0%, respectivamente. No nono dia foram de 30,4% e 29,5%, diferindo significativamente de 0% e 3% (Tabela 2).

Estes resultados podem ser explicados, segundo Rangel et al. (2023), pela hidrofobicidade variável que o biochar pode apresentar em função da matéria-prima, o que modifica sua interação com substâncias no solo e com a água. Fogaça (2023)

demonstrou que o biochar de lodo de esgoto produzido sob temperatura de pirólise de 300 °C apresentou caráter hidrofóbico. Batista et al. (2018) concluíram que a porosidade e área superficial do biochar estão correlacionadas à capacidade de retenção de água, os diferentes tipos de biochar utilizados apresentaram poros entre 0,5 e 50 micrômetros que retém água disponível para as plantas, área superficial entre 43 e 186 m² g⁻¹ e hidrofobicidade.

Tais resultados indicam que a variação de tensão dos tratamentos com 9% e 12% em relação aos tratamentos com 0% e 3% de BLE para uma umidade próxima, pode ser explicada pela hidrofobicidade desse material. A maior porcentagem do biochar em 9% e 12% fez com que o solo apresentasse menor tensão, pois parte da água estava retida nos poros do biochar e suas partículas de caráter hidrofóbico não interagiram fortemente com a água. Já nas doses de 0 e 3% de BLE, a interação entre a água e as partículas do solo foi predominante e mais intensa por conta de seu caráter hidrofílico, resultando em maior tensão.

Tabela 2. Tensões para os dias 3, 6, 7, 8 e 9 após o início do processo de secagem do solo.

Dose de BLE	Dias									
	3		6		7		8		9	
	Tensão (kPa)	Va	Tensão (kPa)	Va	Tensão (kPa)	Va	Tensão (kPa)	Va	Tensão (kPa)	Va
0	12,3		23,3		35,5		55,8a		76,3a	
3	13,2	7,3	25,9	11,2	38,9	9,6	58,6a	5	81,8a	7,2
6	12,1	-1,6	21,3	-8,6	30,0	-15,5	46,1ab	-17,4	64,4ab	-15,6
9	11,9	-3,2	19,9	-14,6	27,1	-23,7	38,8b	-30,6	53,1b	-30,4
12	11,6	-5,4	21,7	-6,9	29,1	-18	40,2b	-28,0	53,8b	-29,5

Va: variação percentual de cada dose de BLE em relação a 0% de BLE.

No entanto, esses valores divergentes de tensão não interferem significativamente na água presente no solo, uma vez que a umidade se manteve sem variação para todos os tratamentos. É possível concluir que nas dosagens utilizadas e para o intervalo entre 0 e 100 kPa o BLE não retém água no solo suficiente para superar longos períodos de restrição hídrica (TANURE, 2018).

Vendruscolo et al. (2018) demonstraram que o biochar favorece o crescimento radicular pela melhoria das condições físicas do solo, com incremento de biochar a densidade diminuiu significativamente até a profundidade de 0,2 m, e a aeração foi superior a 10% até 0,4 m, valor considerado ideal para o desenvolvimento radicular. Silva (2016) demonstrou que o biochar também favorece o crescimento radicular pela melhoria das condições químicas do solo, sendo assim, sua adição pode auxiliar na tolerância ao déficit hídrico por conta da exploração de maior volume e profundidade de solo pelas raízes.

Os tensiômetros instalados no mesmo vaso (para a mesma dose de BLE) apresentaram resultados de tensão próximos em cada leitura, com coeficiente de variação (CV) baixo nos primeiros dias de avaliação e aumentando com a secagem do solo, sendo de no máximo de 6,66% com 12% de BLE no terceiro dia, 12,07% em 3% de BLE no sexto dia e de 17,38% em 6% de BLE no nono dia (Tabela 3). Com o secamento do solo houve maior variação das tensões entre os tensiômetros de um mesmo tratamento em todas as doses de BLE.

Tabela 3. Tensão dos tensiômetros de cada tratamento nos dias 3, 6 e 9 após o início do processo de secagem do solo.

Dia 3					
Doses de Biochar de lodo de esgoto (BLE) (%) v/v					
n° do Tensiômetro	0	3	6	9	12
	Tensão (kPa)	Tensão (kPa)	Tensão (kPa)	Tensão (kPa)	Tensão (kPa)
1	12,90	13,90	12,89	11,99	12,90
2	13,32	13,50	12,65	12,02	12,10
3	12,21	13,04	11,69	11,88	11,48
4	11,21	12,86	12,22	11,93	11,25
5	12,45	13,27	11,45	11,77	11,08
6	12,08	13,57	11,55	11,85	10,88
Média	12,33	13,23	12,08	11,91	11,37
DesvPad	0,73	0,27	0,60	0,09	0,76
CV (%)	5,90	2,04	5,01	0,78	6,66

Dia 6					
Tensiômetro	Tensão (kPa)	Tensão (kPa)	Tensão (kPa)	Tensão (kPa)	Tensão (kPa)
1	25,68	29,44	23,86	20,99	24,91
2	25,05	29,85	24,14	21,11	23,51
3	22,09	24,31	22,07	19,8	20,15
4	22,48	24,08	21,13	20,03	21,80
5	22,03	23,99	23,86	18,60	19,60
6	22,37	23,66	18,20	18,94	19,98
Média	22,43	24,20	18,62	19,91	20,98

DesvPad	1,63	2,92	2,53	1,03	2,16
CV(%)	7,28	12,07	11,86	5,17	10,30
Dia 9					
Tensiômetro	Tensão (kPa)	Tensão (kPa)	Tensão (kPa)	Tensão (kPa)	Tensão (kPa)
1	85,28	91,70	76,78	61,40	57,36
2	84,57	99,60	71,72	56,12	63,40
3	79,76	75,30	69,97	54,23	49,59
4	80,85	77,01	67,30	52,11	51,84
5	65,09	73,96	50,41	47,05	48,12
6	62,27	73,35	50,49	48,10	52,60
Média	80,31	76,16	64,38	53,17	52,22
DesvPad	10,04	11,07	11,19	5,33	5,66
CV (%)	12,50	14,54	17,38	10,02	10,84

DesvPad: Desvio Padrão; CV: Coeficiente de Variação.

5.2. Relação umidade x tensão para as doses de BLE

Para garantir comparação equivalente entre as dosagens de biochar, uma vez que a umidade inicial não foi a mesma para todos, a partir da equação de regressão de 3° grau foram encontradas as umidades correspondentes às tensões de 20, 40, 60 e 80 kPa para todas as doses de biochar. Aplicando-se a análise de variância (Tabela 4 e Figura 6) observou-se que a diferença de umidade entre as doses de biochar não foi significativa para nenhuma dessas tensões.

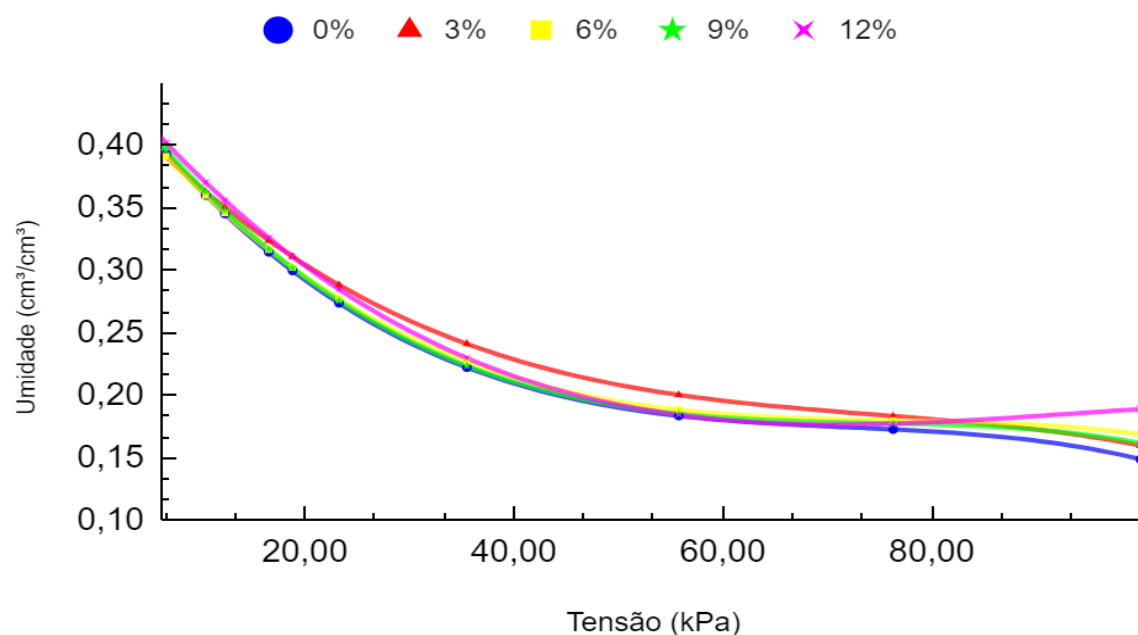


Figura 6. Curvas de relação tensão x umidade do solo para cada dose de BLE.

Equação (0%): $y = 0,462 - 0,0112x + 0,00015x^2 - 0,000000693x^3$, $R^2 = 0,979$
 Equação (3%): $y = 0,448 - 0,00926x + 0,000115x^2 - 0,000000512x^3$, $R^2 = 0,988$
 Equação (6%): $y = 0,456 - 0,0105x + 0,000135x^2 - 0,000000587x^3$, $R^2 = 0,983$
 Equação (9%): $y = 0,466 - 0,0113x + 0,00015x^2 - 0,000000674x^3$, $R^2 = 0,979$
 Equação (12%): $y = 0,466 - 0,0103x + 0,000118x^2 - 0,000000427x^3$, $R^2 = 0,981$
 y: Umidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e x: Tensão (kPa)

Tabela 4. Umidade para tensões de 20, 40, 60 e 80 kPa em função das doses de biochar

Doses de biochar	Tensão (kPa) e variação das doses de BLE em relação a 0% de BLE (Va%)							
	20 kPa	Va	40 kPa	Va	60 kPa	Va	80 kPa	Va
0	0,291	0	0,208	0	0,179	0	0,168	0
3	0,304	4,47	0,218	4,81	0,193	7,82	0,18	7,14
6	0,294	1,03	0,215	3,37	0,185	3,35	0,176	4,76
9	0,295	1,37	0,211	1,44	0,182	1,68	0,177	5,36
12	0,302	3,78	0,214	2,88	0,182	1,68	0,176	4,76

Tanure (2018) obteve resultados divergentes desse trabalho para biochar de casca de eucalipto nas dosagens entre 5 e 60 g kg^{-1} . Os resultados indicaram que há aumento linear na retenção de água pelo solo com a adição de biochar, entretanto concluiu que nas dosagens viáveis para utilização na agricultura tal ganho de umidade não é suficiente por si só para enfrentar momentos de restrição hídrica. Abel et al. (2013) também obtiveram resultados divergentes, concluindo que a adição de biochar aumenta a capacidade de retenção de água em solos arenosos e com pouca matéria orgânica, porém para solos argilosos não encontrou diferenças significativas.

Fogaça et al. (2019), em condições de campo, obtiveram resultados que corroboram com este trabalho. Para a variável água prontamente disponível, que consideraram a quantidade entre 0 e 100 kPa, faixa de medida desse trabalho, não encontraram diferença significativa com a adição de 3,21 Mg ha^{-1} de biochar de madeira de eucalipto em relação ao solo sem biochar. Entretanto, a disponibilidade

total de água no solo na profundidade de 0-10 cm apresentou diferença equivalente a cerca de $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, ou $0,03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, para fins de ganho de água no manejo de irrigação esse valor é insignificante, porém quando considerado o sistema em grande escala esse ganho é relevante na reserva de água no solo.

A influência do biochar nas características de retenção de água desses tratamentos se dá somente devido às modificações nas características de porosidade e densidade que o biochar confere ao solo, pois para que seja possível verificar os efeitos de agregação que o biochar pode conferir é preciso que ele esteja em contato com o solo por mais tempo (MOTA, 2020).

6. CONCLUSÕES

As dosagens de biochar de lodo de esgoto não apresentaram diferença significativa entre si para a umidade do solo nas tensões de 20, 40, 60 e 80 kPa.

A dosagem de biochar não influenciou significativamente na umidade do solo ao longo do tempo de secagem, porém houve diferença significativa na tensão do solo em função do tempo de secagem, a partir do oitavo dia as doses 9% e 12% apresentaram tensão em torno de 30% menor que 0%. A dose 6% de BLE não se diferenciou significativamente de nenhum tratamento.

É possível concluir que para as dosagens utilizadas de biochar de lodo de esgoto, não houve acréscimo na capacidade de retenção de água do solo que possa impactar no manejo de irrigação para as tensões entre 0 e 100 kPa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEL, S. et al. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma*, v. 202, p. 183-191, 2013.
- ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.15, n.2, p.111-116. 2011
- BATISTA, E. M. C. C et al. Effect of surface and porosity of biochar on water holding capacity aiming indirectly at preservation of the Amazon biome. *Nature*, v. 8, p. 10677. 2018
- BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. Manual de Irrigação. 8ª ed. Viçosa. Editora UFV. 2006
- BEZERRA, J. F. R.; GUERRA, A. J. T.; RODRIGUES, S. C. Relações entre potencial matricial no solo e cobertura vegetal em uma estação experimental. *Soc. & Nat.* n. 1, p. 103-114. Uberlândia. 2012.
- BRADY, N.C.; WEIL, R.R. Elementos de natureza e propriedades dos solos. 3a. ed. Bookman. 2013 (Tradução técnica: Igo Fernando Lepsch)
- BRASIL. Atlas da Irrigação, 2023, Agência Nacional de Águas, Brasília. 2023.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº498, de 19 de agosto de 2020. Publicado no D.O.U. 2020.
- COELHO, S. L.; TEIXEIRA, A. S. Avaliação do tensiômetro eletrônico no monitoramento do potencial matricial de água no solo. *Eng. Agric.* v. 24, n. 3, p. 536-545. Jaboticabal. 2004.
- CONZ, R. F. Caracterização de matérias-primas e *biochars* para aplicação na agricultura. 132 p. Dissertação (Solos e Nutrição de plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.. Piracicaba. 2015.
- EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5 ed. Brasília: Embrapa Solos, 356 p., 2018.
- FARIAS, W.M. Biochar de lodo de esgoto como condicionador do solo: Efeitos nas propriedades agronômicas, fertilidade do solo e qualidade da matéria orgânica. 119 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília. Brasília. 2018.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: um sistema computacional de análise estatística. *Ciência e Agrotecnologia [online]*. v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FOGAÇA, A. M. Aplicação de biochar e impacto na qualidade física do solo e características morfofisiológicas do eucalipto. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa. 2019.

FOGAÇA, A. M. et al. Influência do biochar na disponibilidade de água de um latossolo. VI Reunião Paranaense de Ciências do Solo. Ponta Grossa. 2019.

FOGAÇA, A. M. Pirólise orientada de lodo de esgoto para aplicação em solos agrícolas. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa, 2023.

GALVÃO, I. M. Caracterização de propriedades físico-hídricas de solo condicionado com biochar de cana-de-açúcar. Tese (Doutorado em Engenharia de sistemas agrícolas) - Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2023.

LEÃO, T.P. Solos: Uma introdução: Notas de aula da disciplina de Fundamentos de Ciência do Solo. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. 2022.

LEÃO, T. P. Water retention and penetration resistance equations for the least limiting water range. *Scientia Agricola*, v. 76, n. 2, p. 172-178, 2019.

LEHMANN, J.; STEPHEN J. Biochar for environmental management: science and technology. Earthscan, London, 944p., 2009.

LIMA, J. R. S. et al. Biochar de lodo de esgoto aumenta a produção e eficiência no uso de água da alface. *Revista Brasileira de Geografia Física* v.13, n. 04, p. 1720-1729. 2020.

LIMA, E. F. A. Sistema de monitoramento automático das características hídricas dos solos de cafezais visando otimização da irrigação. *Extensão Rural: práticas e pesquisas para o fortalecimento da agricultura familiar - Volume 1*. Guarujá. 2021

LORENCETTI, G. A. T. Lodo de ETE agroindustrial: Uso agrícola e produção de biochar. 100 p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco. 2022.

MANGRICH, A. S., MAIA, C. M. B. F., NOVOTNY, E.H. Biocarvão: As terras pretas de índios e o sequestro de carbono. *Ciência Hoje*, v. 47, n. 281, p. 48-52, 2011.

MELO, H. F. Atributos físicos e Carbono orgânico de um cambissolo háplico aluminico submetido a diferentes métodos de incorporação e doses de calcário. 112 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual de Ponta Grossa. 2020.

MOTA, M. F. C. Uso de biochar de eucalipto na produção de cana-de-açúcar. 67 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais. Montes Claros. 2020

PEDROZA, M. M. et al. Produção e tratamento de lodo de esgoto - uma revisão. Revista Liberato. v. 11, n. 16, p. 89-188. Novo Hamburgo. 2010

PENG et al. Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in Southern China: Temperature and duration-dependent rice straw-derived biochar. Soil and Tillage Research. v. 112, n. 2, p. 159-166. 2011

PIMENTEL, J. N. F. Impacto da escassez hídrica na agricultura irrigada e estratégia de cultivo e manejo da irrigação em condições de déficit hídrico. 58 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

PITUELLO, C. et al. Effects of biochar on the dynamics of aggregate stability in clay and sandy loam soils. European journal of soil science, v. 69, n. 5, p. 827-842, 2018

RANGEL, A. M. et al. The use of biochar for removal of emerging contaminants in contaminated water. Journal of Interdisciplinary Debates, [S. l.], v. 4, n. 03, p. 62–82, 2023.

REZENDE, E. I. P. et al. Biocarvão (Biochar) e Sequestro de Carbono. Rev. Virtual Quim., v. 3, n. 5, p. 426-433. 2011

SILVA, I. C. B. Atributos do solo e características agronômicas do feijoeiro adubado com biochar. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Minas Gerais. Montes Claros, 2016.

TANURE, M. M. C. Produção de biocarvões para estudos de retenção de água, condutividade hidráulica e resistência à penetração em latossolo. 169 p. Tese (Solos e Nutrição de Plantas) - Departamento de solos, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2018.

TRAZZI, P. A. et al. Biocarvão: Realidade e potencial de uso no meio florestal. Ciência Florestal, [S. l.], v. 28, n. 2, p. 875–887. Santa Maria. 2018.

VAN LIER, Q.J. Física do solo: baseada em processos. Piracicaba. Edição do autor. 2020

VENDRUSCOLO, E. P. et al. Efeitos do biochar, culturas de cobertura e lodo de esgoto nos atributos físicos do solo. Cienc. suelo, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, v. 36, n. 1, p. 01-10. 2018.

VILELA, L. Intensificação e sustentabilidade dos sistemas de produção agrícolas. Megatendências da Ciência do Solo 2030 - Embrapa, E-book. cap. 5. Brasília, 2022.

WANG, J.; XIONG, Z.; KUZYAKOV, Y. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. Gcb Bioenergy, v. 8, n. 3, p. 512-523, 2016.